

**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE VARIABLES  
FOTOVOLTAICAS DE DOS SISTEMAS DE PANELES  
SOLARES (MONOCRISTALINO Y POLICRISTALINO)  
EN BOGOTÁ.**

**Propuesta de Trabajo de Grado, presentada como requisito para optar al  
título de Magister en Docencia e Investigación Universitaria**

**Investigador**

**Janett Barbosa Urbano**

**Director**

**Ing. Hernando Camacho Camacho Msc.**

**UNIVERSIDAD SERGIO ARBOLEDA  
ESCUELA DE POSTGRADOS  
MAESTRÍA EN DOCENCIA E INVESTIGACIÓN UNIVERSITARIA  
Bogotá, mayo de 2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi profundo agradecimiento para aquellas personas que con sus ideas, comentarios, conversaciones y análisis sobre el tema de este trabajo, me ayudaron a mejorar en muchos aspectos.

También agradezco a los profesores y profesionales de la Maestría y de la Universidad Sergio Arboleda por su colaboración y aportes.

Expreso mis más sinceros agradecimientos por su asesoría en la elaboración de esa tesis, al Ingeniero Hernando Camacho Camacho, Msc., quien por su puntual y acertada asistencia, fue fundamental para llevar a feliz término mi trabajo final de maestría.

# **CONTENIDO**

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>PALABRAS CLAVE</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (Formulación de la investigación)</b>	<b>2</b>
<b>1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>2</b>
<b>1.2 PREGUNTA PROBLEMA</b>	<b>5</b>
<b>1.2.1 Sistematización del problema</b>	<b>5</b>
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN</b>	<b>5</b>
<b>1.4 HIPÓTESIS</b>	<b>6</b>
<b>1.5 OBJETIVOS</b>	<b>7</b>
<b>1.5.1 Objetivo General</b>	<b>7</b>
<b>1.5.2 Objetivos específicos</b>	<b>7</b>
<b>1.6 ASPECTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>7</b>
<b>1.6.1 Tipo de investigación</b>	<b>7</b>
<b>1.6.2 Fases de la investigación</b>	<b>8</b>
<b>1.6.2.1 Explicación de las fases</b>	<b>8</b>
<b>1.6.3 Técnicas de recolección de datos</b>	<b>9</b>
<b>1.7 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES</b>	<b>12</b>
<b>1.8 PRESUPUESTO</b>	<b>12</b>
<b>1.9 IMPACTOS ESPERADOS</b>	<b>13</b>
<b>1.9.1 Relacionados con la generación de conocimiento y/o nuevos desarrollos tecnológicos</b>	<b>13</b>
<b>1.9.2 Conducentes al fortalecimiento de la capacidad científica nacional</b>	<b>14</b>
<b>1.9.3 Dirigidos a la apropiación social del conocimiento</b>	<b>14</b>
<b>2. CAPÍTULO II MARCO REFERENCIAL</b>	<b>15</b>
<b>2.1 LAS ENERGÍAS RENOVABLES (MARCO TEÓRICO)</b>	<b>15</b>
<b>2.2 MARCO HISTÓRICO</b>	<b>19</b>
<b>2.2.1 En el mundo</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2 En Colombia</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3 Energía fotovoltaica en Bogotá</b>	<b>25</b>
<b>2.3 MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>25</b>
<b>2.3.1 Energías renovables</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2 Radiación solar</b>	<b>26</b>
<b>2.3.3 Efecto fotovoltaico</b>	<b>26</b>

2.3.4	Biomasa	27
2.3.5	Energía eólica	27
2.3.6	Energía hidráulica	27
2.4	MARCO LEGAL	27
2.4.1	Uso eficiente de la energía	28
2.4.2	Desarrollo sostenible	28
2.4.3	Aprovechamiento óptimo	28
2.4.4	Fuente energética	29
2.4.5	Cadena Energética	29
2.4.6	Eficiencia Energética	29
2.4.7	Fuentes convencionales de energía:	29
2.4.8	Fuentes no convencionales de energía	29
2.4.9	Energía solar	30
2.5	MARCO CONTEXTUAL	30
2.5.1	Perfil radiométrico de Bogotá	30
3.	CAPÍTULO III PANORÁMICA DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA (Estado del arte)	34
3.1	INTRODUCCIÓN	34
3.2	EL RECURSO SOLAR	34
3.3	EL RECURSO SOLAR EN EL MUNDO (INVESTIGACIONES)	43
3.3.1	Universidad del estado de Colorado (USA)	43
3.3.2	Universidad de Alicante	43
3.3.3	Escogiendo las energías renovables	44
3.3.4	Nuevas tecnologías, precios y competencia	45
3.3.5	El caso de la India	46
3.4	El contexto nacional colombiano	47
3.4.1	Cifras sobre los recursos naturales en Colombia	49
3.4.2	Sistemas solares en Colombia	51
3.4.3	Situación actual de energía eléctrica en Colombia	56
3.5	Energía fotovoltaica en la ciudad de Bogotá	59
4.	CAPÍTULO IV PRINCIPIOS DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	62
4.1	INTRODUCCIÓN	62
4.2	LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	62
4.2.1	Captadores de energía	63
4.2.2	Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica	67
4.2.3	El regulador	69
4.2.4	El inversor	72
4.2.5	Conductores y conectores	72
4.3	FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	74
4.3.1	Los fotones producen electricidad. El efecto fotovoltaico	74
4.3.2	En el pasado del efecto fotoeléctrico	75
4.3.3	Diferencias Entre Mono Y Poli	77
4.3.4	Configuración de un panel fotovoltaico	79
5.	CAPÍTULO V DATOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	81

5.1 ALGUNOS DATOS APORTADOS POR LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: MUESTREO Y ANÁLISIS	81
5.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DE REFERENCIA	81
5.3 LAS INTERFACES PARA LA TOMA DE DATOS	84
5.4 MUESTRA DE DATOS OBTENIDOS	87
5.5 DATOS OBTENIDOS CON CIRCUITO ABIERTO	87
5.6 DATOS OBTENIDOS CON CARGA O RESISTENCIA DE 30 OHM	90
5.7 DATOS Y GRÁFICOS SOBRE LOS PROMEDIOS DIARIOS DE TODAS LAS VARIABLES	103
6. CAPÍTULO VI OTROS APORTES Y CONCLUSIONES GENERALES	112
6.1 OTROS APORTES	112
6.2 CONCLUSIONES GENERALES SOBRE DATOS Y MEDIDAS	117
6.3 OTRAS CONCLUSIONES GENERALES VALIOSAS	118
BIBLIOGRAFÍA	124

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1 Cronograma de actividades</b>	<b>12</b>
<b>Tabla 1.2 Presupuesto</b>	<b>13</b>
<b>Tabla 2.1 Potencial energético solar</b>	<b>19</b>
<b>Tabla 3.1 Datos sobre constitución del Sol</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 3.2 Características de la Central Fotovoltaica de Alicante</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 3.3 Potencial energético solar en Colombia</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 3.4 Acuerdos internacionales relacionados con los bosques</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 3.5 Zonas de Reserva Forestal de Ley 2a de 1959</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 3.6 Ciudades, empresas y sistemas instalados</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 3.7 Censo de sistemas solares térmicos</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 3.8 Evolución del área instalad para los SST</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 3.9 SST instalados en Bogotá.</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 3.9 Ahorro de energía eléctrica en varias ciudades</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 5.1 Valores de radiación promedio en Colombia</b>	<b>81</b>
<b>Tabla 5.1 Voltajes en circuito abierto (muestra)</b>	<b>87</b>
<b>Tabla 5.2 Estadística de los voltajes en circuito abierto</b>	<b>88</b>
<b>Tabla 5.3 voltajes de los paneles con carga de 30Ohm</b>	<b>93</b>
<b>Tabla 5.4 Estadística de voltajes con resistencia de 30 Ohm</b>	<b>94</b>
<b>Tabla 5.5 Estadística de corriente con resistencia de 30 Ohm</b>	<b>95</b>
<b>Tabla 5.6 Estadística de potencia con resistencia de 30 Ohm</b>	<b>95</b>
<b>Tabla 5.7 Estadística de radiación con resistencia de 30 Ohm</b>	<b>96</b>
<b>Tabla 5.8 Rangos de voltajes y frecuencias panel mono</b>	<b>98</b>
<b>Tabla 5.9 Estadística de voltajes mono</b>	<b>98</b>

<b>Tabla 5.10 Rangos de voltajes y frecuencias poli</b>	<b>100</b>
<b>Tabla 5.11 Estadística de voltajes poli</b>	<b>100</b>
<b>Tabla 5.12 Rangos de potencias y frecuencias</b>	<b>101</b>
<b>Tabla 5.13 Estadística de potencias mono</b>	<b>101</b>
<b>Tabla 5.14 Rangos de potencias y frecuencias</b>	<b>102</b>
<b>Tabla 5.15 Estadística de potencias poli</b>	<b>102</b>
<b>Tabla 5.16 Datos de los promedios diarios de las variables en julio 2011</b>	<b>104</b>
<b>Tabla 5.17 Carga contra voltajes máximos mono/poli</b>	<b>110</b>
<b>Tabla 5.18 Corriente máxima mono/poli contra carga</b>	<b>110</b>
<b>Tabla 5.19 Potencia máxima mono/poli contra carga</b>	<b>111</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1 Colombia en la Zona Intertropical</b>	<b>6</b>
<b>Figura 1.2 Fases de la investigación</b>	<b>8</b>
<b>Figura 1.3 Recolección de datos de los sistemas fotovoltaicos</b>	<b>10</b>
<b>Figura 2.1 Las energías renovables</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2.2 Historia de la energía solar fotovoltaica</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2.3 Nuevas formas de celdas solares</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2.4 Radiación solar en Bogotá</b>	<b>33</b>
<b>Figura 3.2 Radiación solar</b>	<b>38</b>
<b>Figura 3.3 Espectro electromagnético</b>	<b>38</b>
<b>Figura 3.4 Componentes de la radiación solar</b>	<b>39</b>
<b>Figura 3.5 Usos de la energía solar</b>	<b>40</b>
<b>Figura 3.6 Energía solar, otros usos</b>	<b>42</b>
<b>Figura 3.7 Arquitectura bioclimática</b>	<b>42</b>
<b>Figura 3.8 Potencial energético por subregiones en Colombia</b>	<b>56</b>
<b>Figura 4.1 Componentes básicos de un sistema fotovoltaico</b>	<b>62</b>
<b>Figura 4.2 Panel monocristalino</b>	<b>64</b>
<b>Figura 4.3 Panel policristalino</b>	<b>64</b>
<b>Figura 4.4 Paneles conectados en serie</b>	<b>67</b>
<b>Figura 4.5 Paneles conectados en paralelo</b>	<b>67</b>
<b>Figura 4.6 Baterías para sistemas fotovoltaicos</b>	<b>68</b>
<b>Figura 4.7 Función del regulador</b>	<b>69</b>
<b>Figura 4.8 Manejo de carga de un regulador</b>	<b>70</b>



<b>Figura 4.9 Regulador</b>	<b>71</b>
<b>Figura 4.10 Desconexión de la batería</b>	<b>71</b>
<b>Figura 4.11 El inversor</b>	<b>72</b>
<b>Figura 4.12 Secuencia de conexiones de los sistemas fotovoltaicos</b>	<b>73</b>
<b>Figura 4.13 Efecto fotovoltaico</b>	<b>74</b>
<b>Figura 4.14 Descubridores del efecto fotoeléctrico.</b>	<b>75</b>
<b>Figura 4.15 Celdas cristalinas</b>	<b>77</b>
<b>Figura 4.16 Elementos que componen un panel fotovoltaico</b>	<b>79</b>
<b>Figura 5.1 Temperatura máxima y mínima en Bogotá</b>	<b>82</b>
<b>Figura 5.2 Precipitaciones en Bogotá</b>	<b>83</b>
<b>Figura 5.3 Brillo solar en Bogotá</b>	<b>84</b>
<b>Figura 5.4 Interfaces</b>	<b>86</b>
<b>Figura 5. 5. Voltajes en circuito abierto de los dos paneles</b>	<b>89</b>
<b>Figura 5.6 Voltajes con resistencia 30 Ohm para mayo</b>	<b>97</b>
<b>Figura 5.7 Histograma voltajes mono con <math>R = 30\text{ Ohm}</math></b>	<b>99</b>
<b>Figura 5.8 Histograma voltajes poli con <math>R = 30\text{ Ohm}</math></b>	<b>100</b>
<b>Figura 5.9 Histograma de potencias del mono con <math>R = 30\text{ Ohm}</math></b>	<b>101</b>
<b>Figura 5.10 Histograma de potencias del poli con <math>R = 30\text{ Ohm}</math></b>	<b>102</b>
<b>Figura 5.11 Promedio diario de voltajes mono/poli</b>	<b>105</b>
<b>Figura 5.12 Promedios diarios de corriente mono/poli</b>	<b>105</b>
<b>Figura 5.13 Promedios diarios de potencia mono/poli</b>	<b>106</b>
<b>Figura 5.14 Promedios diarios de temperatura mono/poli</b>	<b>106</b>
<b>Figura 5.15 Promedios diarios de radiación mono/poli</b>	<b>107</b>
<b>Figura 5.16 Potencias mono/poli julio 2011</b>	<b>108</b>
<b>Figura 5.17 Voltajes mono/poli julio 2011</b>	<b>109</b>
<b>Figura 5.18 Voltajes máximos mono/poli contra carga</b>	<b>110</b>

<b>Figura 5.19 Corriente máxima mono/poli contra carga</b>	<b>110</b>
<b>Figura 5.20 Potencia máxima mono/poli contra carga</b>	<b>111</b>
<b>Figura 5.21 Voltajes mono/poli contra radiación</b>	<b>111</b>
<b>Figura 5.22 Potencias mono/poli contra radiación</b>	<b>111</b>
<b>Figura 6.1 Fotos de paneles instalados</b>	<b>112</b>
<b>Figura 6.2 Laboratorio de energía solar fotovoltaica.</b>	<b>113</b>
<b>Figura 6.3 Investigación formativa</b>	<b>114</b>
<b>Figura 6.4 Proyectos de aula con estudiantes de ingeniería de la UCC</b>	<b>115</b>

## **RESUMEN**

Se presenta a continuación una investigación sobre energía solar fotovoltaica en Bogotá. Se han implementado dos sistemas fotovoltaicos, uno con panel monocristalino y otro con panel policristalino para realizar toma de medidas de voltajes, corrientes y potencias con el fin de mostrar el comportamiento de estas variables en cada sistema mono y poli, bajo condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá.

La comparación entre las variables se hace a través de tablas de datos y gráficos para establecer las diferencias y similitudes entre los voltajes del mono y del poli, cuando los sistemas se encuentran en circuito abierto y con carga o resistencias definidas.

Se muestran, también, algunos estudios en el mundo y en Colombia sobre la energía solar, la problemática de la energía, una clasificación de las energías renovables, los recursos naturales en nuestro país y un breve acercamiento hacia investigaciones realizadas en Bogotá sobre el tema.

Se realiza una descripción general de la energía solar fotovoltaica desde el punto de vista técnico y se resalta su importancia.

Finalmente, se describen algunas conclusiones importantes de la investigación, en especial, sobre las medidas tomadas de los sistemas fotovoltaicos y, algunos aportes generales del estudio.

## **PALABRAS CLAVE:**

Voltaje, corriente, panel solar, potencia, energías renovables, monocristalino, policristalino, sistemas fotovoltaicos.

## ***CAPÍTULO I ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (Formulación de la investigación)***

### **6.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

El planeta Tierra enfrenta en estos momentos una de las crisis más complejas de su historia, nos referimos a la energía y su uso. Nuestro mundo, goza de incontables recursos energéticos de todo tipo: animal, vegetal, mineral, químico, electromagnético, etc. Pero, la problemática actual, evidencia que la forma en que los hemos tomado, no ha sido la mejor.

Son muchos los factores que han puesto de manifiesto la necesidad de enfrentar este problema de inmediato, con una nueva concepción de la energía y su aprovechamiento, así como de las acciones sociales, económicas y políticas para resolverlo.

Los informes científicos serios revelan una preocupante situación de contaminación, devastación de especies -muchas de ellas a punto de la extinción-, de deterioro de la capa de ozono de la atmósfera terrestre, de tala indiscriminada de los bosques y selvas del mundo (inquietante la selva amazónica seriamente amenazada), de pesca también indiscriminada de los mares y océanos, etc. Estos datos muestran que la actividad humana depredadora que, hasta ahora, se había visto como natural, si ha tenido que ver con el deterioro ambiental y un pésimo aprovechamiento de los recursos naturales, de tal manera que, si no atendemos de forma urgente y con soluciones de fondo, el planeta puede llegar a sufrir un colapso en poco tiempo.

En un informe elaborado por el Banco Mundial se menciona:

“La actividad humana está calentando el planeta. Durante el pasado milenio, la oscilación de temperatura media de la Tierra se mantuvo dentro de un intervalo de menos de 0,7°C; en

cambio, las emisiones de gases de efecto invernadero de origen humano han provocado un aumento dramático de la temperatura del planeta durante el último siglo. El aumento futuro proyectado durante los próximos 100 años debido al crecimiento de las emisiones podría representar un calentamiento del planeta de 5°C con respecto al período preindustrial. Este calentamiento no se ha registrado nunca en la historia de la humanidad y los efectos físicos resultantes limitarían gravemente el desarrollo. Sólo con medidas inmediatas y ambiciosas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es posible evitar este calentamiento peligroso.” (Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento. Banco Mundial, 2010).

En efecto, para una situación tan preocupante, urge medidas globales que resuelvan el problema. En este sentido, los países miembros de la Organización de Naciones Unidas convinieron en trazar ocho (8) objetivos fundamentales para el desarrollo sostenible en el inicio del tercer milenio. Uno de ellos, el séptimo es:

“Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente”. Para ello es necesario ser conscientes de que: “Para alcanzar la sostenibilidad del medio ambiente es fundamental que los recursos naturales se utilicen de forma inteligente y que se protejan los ecosistemas complejos de que depende nuestra supervivencia. Debe tenerse en cuenta que, la sostenibilidad no podrá lograrse con los modelos actuales de consumo y uso de recursos. Los suelos se están degradando a un ritmo alarmante. Las especies vegetales y animales están desapareciendo a un ritmo sin precedentes. Los cambios climáticos están provocando una elevación del nivel del mar y acrecentando el peligro de sequías e inundaciones. Se sobreexplotan la pesca y otros recursos marinos.” (Naciones Unidas, 2010).

Así, los organismos internacionales tanto gubernamentales como privados hacen esfuerzos para motivar en los países, un cambio en las políticas medio ambientales que permitan solucionar el grave problema de la mala utilización de los recursos y medidas para establecer fuentes no contaminantes e iniciativas inteligentes en el uso de los recursos

existentes. Por ejemplo, según un estudio realizado por el Banco Mundial (BM) y el Gobierno colombiano sobre el medio ambiente en Colombia (Banco Mundial, 2010):

“Los contaminantes que arrojan a la atmósfera el transporte y la industria producen problemas críticos especialmente en los corredores Bogotá-Soacha, Cali-Yumbo, Medellín-Valle de Aburrá, Sogamoso y Barranquilla.” Adicionalmente, menciona: “Los problemas que genera el contaminante conocido como material particulado (diminutas piezas de combustible quemado que viaja por el aire y que salen de los tubos de escape de los vehículos, principalmente), incluidos los que afectan la salud, se reflejan en mayor proporción en las zonas de Fontibón, Puente Aranda y Kennedy en Bogotá.”

El informe también da cuenta de la calidad del aire en Bogotá donde estadísticamente se tiene 31 micro partículas por metro cúbico, muy cerca de ciudades como México que se considera una de las capitales más contaminadas del mundo con 51 micro partículas por metro cúbico; la utilización de los recursos hídricos, las áreas forestales y, en especial, el impacto que ha tenido el desgaste del ambiente en las poblaciones rurales y urbanas. Señala, dicho documento, que ha habido pérdidas por \$1.44 billones de pesos anuales en productividad de los suelos por deforestación que, a pesar de que ha bajado de 600.000 hectáreas en los años 60 a 90.000 en el 2004, no es suficiente para disminuir el riesgo de la pérdida de suelos en el Caribe y la zona de los Andes.

Las llamadas energías no contaminantes dentro de las cuales se contemplan las energías renovables o alternativas, se definen de esta manera por que su fuente no implica contaminación ambiental, es renovable e inagotable. En especial, la energía solar que es la fuente principal del resto de las energías, puesto que el Sol es, prácticamente inagotable y accesible para todo el planeta Tierra, puede ser estudiada y utilizada de diversas formas, en nuestro país.

En este contexto, la energía solar fotovoltaica puede brindar soluciones interesantes para suplir necesidades de energía limpia y libre a largo plazo en la mayor parte de los países del

mundo, teniendo en cuenta los últimos avances tecnológicos que hacen de este recurso, uno de los más valiosos para el logro de un ambiente planetario sostenible.

## **6.5 PREGUNTA PROBLEMA**

¿Cuáles son las diferencias fundamentales entre el comportamiento de las variables fotovoltaicas (voltaje, corriente y potencia) de dos paneles solares, uno monocristalino y otro policristalino en condiciones climáticas de Bogotá?

### **6.5.1 Sistematización del problema**

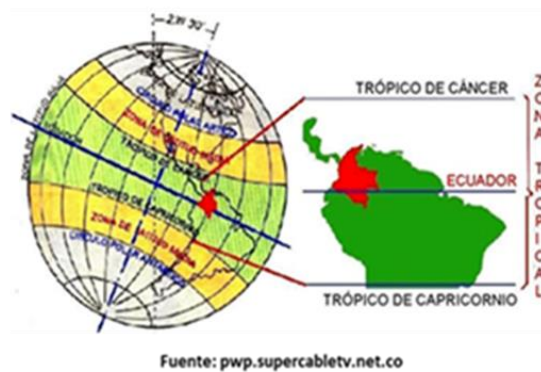
- ¿Cuáles son los niveles de voltaje logrados por cada una de las tecnologías de paneles estudiadas en condiciones reales de la ciudad de Bogotá?
- ¿Cuáles son los niveles de corriente y potencia que pueden aportar los paneles monocristalino y policristalino bajo condiciones climáticas de Bogotá?

## **6.6 JUSTIFICACIÓN**

La motivación fundamental para la realización del presente proyecto consiste en la búsqueda de mejores formas de aprovechamiento de los recursos energéticos en nuestro país, en especial, la energía solar fotovoltaica, teniendo en cuenta que, geográficamente nos encontramos en una de las regiones del planeta de mayor incidencia de los rayos solares (Zona Tórrida o Intertropical). Ver Figura No. 1.1 Colombia en la Zona Intertropical.

Esta situación privilegiada nos permite profundizar en el conocimiento sobre el uso de la energía solar a través de las nuevas tecnologías como los paneles solares. El uso de paneles monocristalino y policristalino, bajo condiciones climáticas específicas de la ciudad de Bogotá, constituye un avance hacia la vanguardia de las energías renovables en nuestro territorio, proporcionando información importante para nuevos estudios en este campo. Se puede suministrar un análisis interesante sobre el comportamiento de las variables fotovoltaicas (voltaje, corriente y potencia), indicando los niveles alcanzados en un ambiente nuboso como el bogotano, para contribuir en el mejoramiento de las tecnologías que se utilizan en lugares con este ambiente meteorológico.

**Figura No. 1.1 Colombia en la Zona Intertropical**



Otra razón es el crecimiento económico en el uso de energías limpias como la fotovoltaica, según lo expresan algunos estudios internacionales: “Solar photovoltaics (including modules, system components, and installation) will grow from a \$29.6 billion industry in 2008 to \$80.6 billion in 2018.” (Malower, Pernick, & Wilder, 2009).

## 6.7 HIPÓTESIS

De acuerdo con las diferencias entre las tecnologías que se van a estudiar: panel monocristalino (Model Eco 60W-M) y panel policristalino (Model SL60CE-18P), en particular, el comportamiento de las variables fotovoltaicas medidas para cada uno de los módulos es diferente, teniendo en cuenta que el voltaje máximo pico para el mono es de 18,86V y para el poli es de 17,49V, según especificaciones del fabricante, aunque las condiciones climáticas son las mismas, puesto que los dos módulos se encuentran instalados en la ciudad de Bogotá y en el mismo lugar.



## **6.8 OBJETIVOS**

### **6.8.1 Objetivo General:**

Comparar el comportamiento de las variables fotovoltaicas (voltaje, corriente y potencia entre dos sistemas de paneles solares (uno monocristalino y otro policristalino), bajo condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá, Colombia.

### **6.8.2 Objetivos específicos:**

- Implementar dos sistemas de captación, almacenamiento y uso de la energía fotovoltaica en la ciudad de Bogotá, que puedan ser monitoreados por computador (uno con panel monocristalino y otro con panel policristalino).
- Realizar mediciones de las siguientes variables fotovoltaicas en los dos sistemas de paneles solares: voltaje, corriente eléctrica y potencia.
- Comparar las variables fotovoltaicas anteriores a partir de gráficos y estadística.

## **6.9 ASPECTOS METODOLÓGICOS**

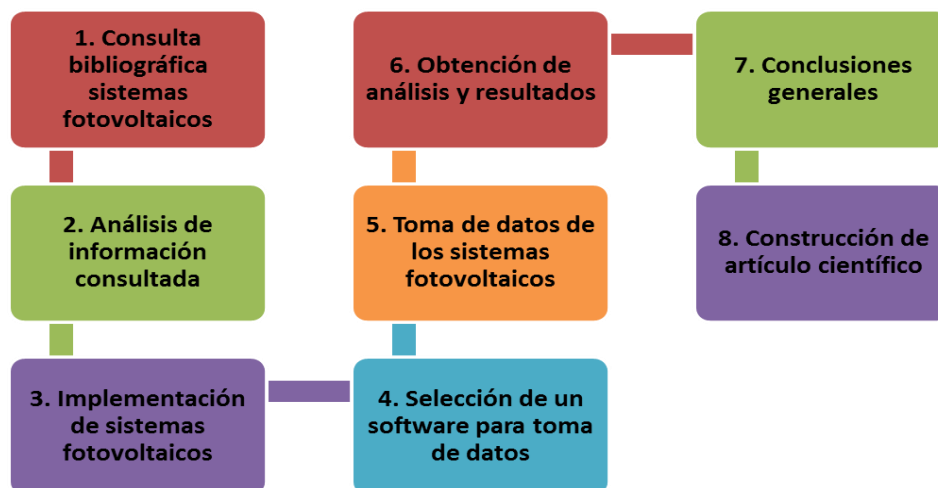
### **6.9.1 Tipo de investigación:**

La investigación que se realizó y cuyos resultados se plasman en este documento, es de tipo descriptivo pues se quiere “establecer las características e identificar comportamientos” (Méndez Álvarez, 2004), de las variables fotovoltaicas de los paneles solares monocristalino y policristalino, además de “aclarar conceptos, establecer preferencias para posteriores investigaciones.”(Méndez Álvarez, 2004).

## 6.9.2 Fases de la investigación:

Se realizarán las siguientes actividades que resumen la metodología de trabajo. Ver Figura 1.2 Fases de la investigación.

**Figura No.1.2 Fases de la investigación**



### 6.9.2.1 Explicación de las fases:

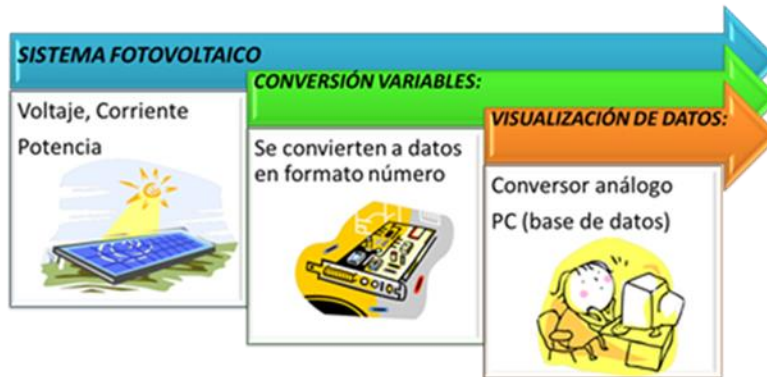
1. Consulta de fuentes de información sobre sistemas fotovoltaicos. Se consultaron aspectos como: historia del uso de los sistemas fotovoltaicos en Colombia y Bogotá, aspectos económicos, empresas que han hecho uso de ésta energía, demanda energética y ofertas del mercado de tecnologías en energías renovables en general:
  - Tecnología utilizada en la fabricación de celdas fotovoltaicas de película delgada y de poli-silicio. Información sobre la medición del nivel de radiación solar en la superficie terrestre, así como parte del historial de estos niveles que ha tenido la ciudad de Bogotá en los últimos tiempos para validar su pertinencia a nivel local.

- Características generales de los sistemas fotovoltaicos como: paneles, reguladores, baterías y sistemas de control.
2. Análisis y estadísticas de la información consultada. Paralelo entre energías convencionales Vs. energía fotovoltaica: ventajas y desventajas.
  3. Implementación de dos sistemas fotovoltaicos en Bogotá. Estos sistemas contemplan el tipo y la cantidad de paneles solares a utilizar, los dispositivos electromecánicos y su control para la maniobrabilidad del panel, las baterías a utilizar, los inversores.
  4. Selección de un software. Controla el correcto funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos, conexión y desconexión para la carga eficiente de baterías y la alimentación hacia la carga y voltajes.
    - El software además almacena esta información en una base de datos para la generación de reportes posteriores sobre el comportamiento de las variables fotovoltaicas que se miden.
  5. Toma de datos de los sistemas fotovoltaicos. Se miden las variables fotovoltaicas que se explican más adelante.
  6. Obtención y análisis de resultados de datos. Se explica en detalle en el siguiente apartado (técnicas de recolección de datos).
  7. Conclusiones generales. Balance general del análisis de datos y demás aspectos de la investigación.
  8. Construcción del artículo científico. Como paso final se socializa con la comunidad académica los resultados encontrados y se compila la información en un artículo científico.

### **6.9.3 Técnicas de recolección de datos:**

En el siguiente esquema se resume la técnica de recolección de datos de los sistemas fotovoltaicos. Ver Figura 1.3 Recolección de datos de los sistemas fotovoltaicos.

**Figura No. 1.3 Recolección de datos de los sistemas fotovoltaicos**



Explicación del esquema:

- Sistema fotovoltaico:
  - Variables medidas: voltaje, corriente, potencia. Estas variables son parámetros generados por el sistema.
- Conversión de variables. Se convierten a datos en formato de número. (interfaz electrónica).
- Visualización de datos:
  - Conversor análogo digital.
  - PC (base de datos).
- Parámetros de análisis de datos:

**NOTA:**

*Se han utilizado elementos adicionales para la toma de los datos como:*

- *Un multímetro digital para calibración periódica de voltajes y corrientes.*
- *Un reóstato de 16  $\Omega$  (ohmios) medidos y 4 A (amperios).*
- *Cables y alambres de conexión.*

Las variables medidas son:

Voltaje panel monocristalino. (V)

Voltaje panel policristalino. (V)

Corriente panel monocristalino (I)

Corriente panel policristalino (I)

Potencia panel monocristalino  $W = V \times I$

Potencia panel policristalino  $W = V \times I$

Se tomaron algunos datos sobre radiación.

Se modificó la expresión matemática tradicional de eficiencia en el panel para valores de radiación a partir de los valores de potencia obtenidos.

$$E = \frac{P_{Mn}}{R \times A} \rightarrow R = \frac{P}{A \times E \times \varphi} \rightarrow \text{donde } \varphi = \frac{P_M}{P_{Mn}}$$

Se obtuvieron gráficos de la siguiente manera, tomados de la base de datos en un tiempo determinado:

❖ Gráficos individuales (cada panel) de:

- Voltaje contra tiempo
- Corriente contra tiempo
- Potencia contra tiempo

Las gráficas anteriores se realizaron sobre datos significativos, horas claves de día-sol; se realiza muestreo general.

❖ Gráficos comparativos entre los dos paneles de:

- Voltaje mono contra voltaje poli.
- Corriente mono contra corriente poli.
- Potencia mono contra potencia poli.

❖ La base de datos fue alimentada con datos de 24 horas, pero para el análisis y gráficos, se seleccionó el rango de 6:00 am hasta las 18:00 pm.

## 6.10 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En la siguiente tabla se muestran las diferentes fases de la investigación y el tiempo estimado en meses que requirió cada actividad. Ver Tabla No. 1.1 Cronograma de actividades.

**Tabla 1.1 Cronograma de actividades**

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES	MESES											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Consulta bibliográfica sobre sistemas fotovoltaicos	X	X	X									
2. Análisis de información consultada		X	X	X								
3. Implementación de dos sistemas fotovoltaicos en Bogotá			X	X	X							
4. Selección de software para toma de datos				X	X	X	X					
5. Toma de datos de los sistemas fotovoltaicos							X	X	X	X	X	
6. Obtención y análisis de resultados de la toma de datos									X	X	X	X
7. Conclusiones generales										X	X	X
8. Construcción del artículo científico											X	X

## 6.11 PRESUPUESTO

El presupuesto que a continuación se muestra fue financiado por la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá y fue aprobado, en el marco de un proyecto de investigación de convocatoria interna en el año 2010. Ver Tabla 1.2 Presupuesto.

Los equipos fueron adquiridos por la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá y se encuentran en funcionamiento para enseñanza y experimentación.

**Tabla 1.2 Presupuesto**

	DESCRIPCIÓN	VALOR SOLICITADO
<b>EQUIPOS</b>	Computador	\$ 2.000.000
	<b>Total equipos</b>	<b>\$ 2.000.000</b>
	1 Panel Solar 12V / 120W Monocristalino	\$ 1'241.143
<b>MATERIALES</b>	Panel Solar 12V / 120W Policristalino	\$ 1'241.143
<b>Y</b>	2 Batería Estacionaria 12 V/100 Ah sellada libre de mantenimiento	\$ 853.334
<b>SUMINISTROS</b>	2 Controlador de Corriente 12 V/10 Amp	\$ 227.272
	2 Juegos de cables de 15 metros positivo y negativo	\$ 181.998
	Gastos envío	\$ 250.000
	<b>Total materiales y suministros</b>	<b>3'994.890</b>
	<b>Total presupuesto</b>	<b>5'994.890</b>

## 6.12 IMPACTOS ESPERADOS

### 6.12.1 Relacionados con la generación de conocimiento y/o nuevos desarrollos tecnológicos:

- Contribución al estado del arte sobre comportamiento de variables fotovoltaicas de dos sistemas de paneles diferentes, en la ciudad de Bogotá.
- Implementación de dos sistemas fotovoltaicos para el estudio de las variables de voltaje, corriente y potencia en Bogotá.
- Una base de datos que puede ser retroalimentada y utilizada para la enseñanza sobre la medición de variables fotovoltaicas en Bogotá.

### **6.12.2 Conducentes al fortalecimiento de la capacidad científica nacional:**

- Consolidación del grupo de investigación al cual pertenece el investigador a cargo.
- Relacionar el grupo de investigación del cual es integrante el investigador, titular de este trabajo, con otros grupos de investigación que estén interesados en temas ambientales y energías renovables.

### **6.12.3 Dirigidos a la apropiación social del conocimiento:**

- La socialización a la comunidad académica de los resultados de la investigación con la construcción de un artículo científico.



### 2.1 LAS ENERGÍAS RENOVABLES (MARCO TEÓRICO)

La revolución industrial trajo consigo grandes beneficios para el avance de la sociedad mundial, de hecho, la vida social actual gira entorno a los adelantos científicos y tecnológicos logrados por la industria, desde las máquinas de vapor hasta los sofisticados computadores; pero también significó graves consecuencias para el planeta, como un acelerado incremento en la contaminación del ambiente, en particular, una emisión agresivamente creciente de los gases de efecto invernadero debido al excesivo uso de los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural. La combustión constituye la principal forma de transformación de dichos combustibles, pero ella genera millones de toneladas de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) y otros óxidos como nitrógeno, azufre y carbono que contaminan la atmósfera, aumentando de manera acelerada el efecto invernadero con severas secuelas para la vida en la Tierra. Esto conllevó al planeta a lo que hoy se define como “calentamiento global”, cuyo efecto es el aumento anormal en la temperatura general de la Tierra, ocasionando desequilibrios climáticos que derivan en inundaciones, sequías, ciclones, tsunamis, etc. y la consiguiente afectación de la economía mundial.

Surgió, por lo tanto, la necesidad de realizar investigación sobre la forma como aprovechamos los recursos naturales, la tecnología utilizada y los costos de la energía. El resultado fue un nuevo marco de acción político, social y económico llamado *energías renovables* por la capacidad de renovación constante e inagotable de los recursos, por ejemplo, la energía solar que viene directamente del Sol y que se considera la energía reina, de la cual derivan las demás. Esta capacidad ha conducido a Europa a: “Although productivity in the photovoltaic industry progresses with automated production and reduced unit and system costs, the rapid market growth will create new jobs in Europe.” (European Communities, 2009).

Una clasificación muy general de las energías renovables, Ver Figura 2.1 Las energías renovables, muestra que éstas se definen de acuerdo con su origen.

Inicialmente se muestra que la energía se clasifica por los conceptos de no renovable (agotable y requiere procesamiento para su uso) y, renovable, (natural e inagotable).

En la primera categoría se encuentran los combustibles fósiles y nucleares, por la forma de procesamiento se consideran energías contaminantes y que dejan residuos peligrosos para la vida.

Por otro lado, se clasifican como indirectas porque es menor la incidencia del Sol. Se encuentran la hidráulica, aprovechamiento de las fuentes de agua como los ríos, los saltos, etc. La eólica, producida por vientos, undimotriz, aprovecha el movimiento mecánico de las mareas y, biomasa que se diversifica en residual y aprovecha las aguas urbanas e industriales; los biocarburantes, que son combustibles líquidos o gaseosos ricos en carbohidratos como el maíz; los cultivos energéticos que se obtienen de la transformación de algunos cultivos como los cereales, el sorgo, etc., y residuos sólidos urbanos, todo lo relacionado con las basuras de las ciudades.

Ahora, están las energías renovables dependientes del Sol, donde la luz solar incide directamente para su funcionamiento son la térmica, donde se utilizan colectores solares para recoger el calor solar y la fotovoltaica, aprovechamiento de la radiación solar con paneles.

**Figura No.2.1 Las energías renovables**



Fuente: <http://fuentesdeenergia.wordpress.com/2010/>

A las energías no solares como la mareomotriz, geotérmica y la de hidrógeno, se les considera en esta categoría porque tienen que ver con procesos del subsuelo terrestre; el calor que emana, es el caso de la geotérmica; el movimiento de las olas, etc.

En este contexto, se desarrollaron tecnologías para un aprovechamiento. Por ejemplo, la tecnología solar fotovoltaica, que también se llama energía solar fotovoltaica, se compone de sistemas fotovoltaicos que producen energía eléctrica directamente de la luz solar.

“Los sistemas fotovoltaicos (FV, en inglés PV) producen energía limpia y confiable sin consumir combustibles fósiles y pueden ser usados en una amplia variedad de aplicaciones.”(Solar Energy International, 2007).

La tendencia actual en cuanto a producción, manejo e investigación en el campo de la energía, se enfoca cada vez más, en el uso de energías renovables, o no convencionales para conseguir mejor cubrimiento de los requerimientos energéticos de la población mundial. Con la creciente demanda de métodos limpios o ambientalmente sostenibles para el mantenimiento de la humanidad, la cuerda central del desarrollo en este sector depende, en gran medida, de la disposición de los Gobiernos y de las mismas Naciones para aceptar el reto de proteger el ambiente y buscar soluciones amigables con el entorno, que aseguren la suplencia de las necesidades tanto en el sector energético, como en el sector económico, sin causar un daño mayor a nuestro ambiente.

Sin embargo, la visión de esta necesidad para países emergentes, como el nuestro, no es evidente ni tiene una dirección definida en lo que respecta al aprovechamiento sostenible de la energía. Ni la política ambiental, ni la política energética, tienen una fundamentación profunda de cambio o que vaya más allá de un papel inmediatista. Esto significa que se pasa por alto el estudio y la aplicación de nuevos métodos realmente contrastantes, para la consecución de resultados que concuerden con las declaraciones de los protocolos medioambientales que rigen las políticas a nivel mundial.

Con todo lo anterior, el panorama no es desesperanzador, cada vez más las relaciones de cooperación y transferencia de tecnología entre países industrializados y países emergentes,

promueven el establecimiento de nuevas culturas sobre el manejo y la consecución de energía limpia, colocando a disposición, la información tecnológica para que el enfoque de políticas medioambientales, desarrollen planes hacia la adaptación y apropiación del conocimiento en el contexto propio de cada Nación.

Ahora bien, la energía solar es una variante tecnológica de las energías renovables, que a pesar de su uso desde los inicios de la humanidad, no había sido explotada en forma activa por parte de las sociedades hasta después de la Segunda Guerra Mundial, aunque la historia de creación de aparatos y máquinas solares para la consecución de calor a partir de la energía solar se remonta incluso al siglo XVII, pero sin gran interés. Sólo los científicos se preocupaban por fabricar estos aparatos que constituían más un atractivo de feria, que un proyecto serio para obtener energía.

Después de la revolución industrial, el desarrollo se vio frenado por los bajos rendimientos de transformación y por el auge de los combustibles fósiles, que cubrían mucho más fácil las necesidades energéticas de la población con niveles de tecnología más alcanzables para la época. Es a principios del siglo XX que aparecen los primeros colectores planos y, posteriormente se empiezan a realizar pruebas y proyectos para encontrar materiales y diseños adecuados para producir energía y disminuir el área en uso, volviendo los sistemas más eficientes.

En Japón, por ejemplo, se patentan antes de la mitad de la década de los treinta cerca de 40 tipos diferentes de calentadores solares para obtener agua caliente a nivel residencial, y a nivel mundial esta forma de aprovechamiento se constituye como una de las principales aplicaciones de la energía solar térmica y con más alto grado de desarrollo técnico y tecnológico. (Meindel & Meindel, 1982)

Infortunadamente, fue un factor crítico llamado calentamiento global, originado por los desechos suministrados por el combustible fósil a la atmósfera terrestre durante más de medio siglo, el que dio de nuevo el punto de partida para que, tanto los gobiernos, como las industrias comenzaran a trabajar arduamente en la investigación de nuevas fuentes de

energía, como es la energía solar. Ver Tabla 2.1 Potencial energético solar.

**Tabla 2.1 Potencial energético solar**

POTENCIAL ENERGÉTICO	RESERVAS	CONSUMO	DURACIÓN
<b>Fuera de la atmósfera terrestre es de 1,4 kw/m2, depende de la zona del planeta, de la época, hora y condiciones atmosféricas</b>	Se estima que la energía que llega del Sol a la Tierra está por el orden de 1.559.280 TWh anuales.	Relacionado íntimamente con la producción y, a su vez, por condiciones climáticas. Existen más de 300 MWe de centrales fotovoltaicas instaladas	Aproximadamente 5 mil millones de años más

*Fuente de datos:* (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009)

## 2.2 MARCO HISTÓRICO

### 2.2.1 En el mundo

Como se muestra en la siguiente figura ilustrativa de la historia de la energía solar fotovoltaica, la evolución de esta tecnología inició por el interés de los científicos y ha finalizado en las grandes compañías, cuyos fines son esencialmente económicos. Ver Figura 2.2 Historia de la energía solar fotovoltaica.

El primer aporte de la industria puede considerarse con:

“los investigadores D.M.Chaplin, C.S. Fuller y G.L.Pearson de los Laboratorios Bell en Murray Hill, New Jersey, producen la primera célula de silicio, publican en el artículo “A New Silicon p-n junction Photocell for converting Solar Radiation into Electrical Power”, y hacen su presentación oficial en Washington (26 abril).” (ASIF, 2008).

Luego, empresas como la norteamericana Hoffman Electronic que colocó en el mercado celdas de 10% de rendimiento, Sharp en Japón, donde se instala un sistema de 242 W en 1963; hacia 1977 la producción mundial de paneles llega a los 500 kW, hasta producciones

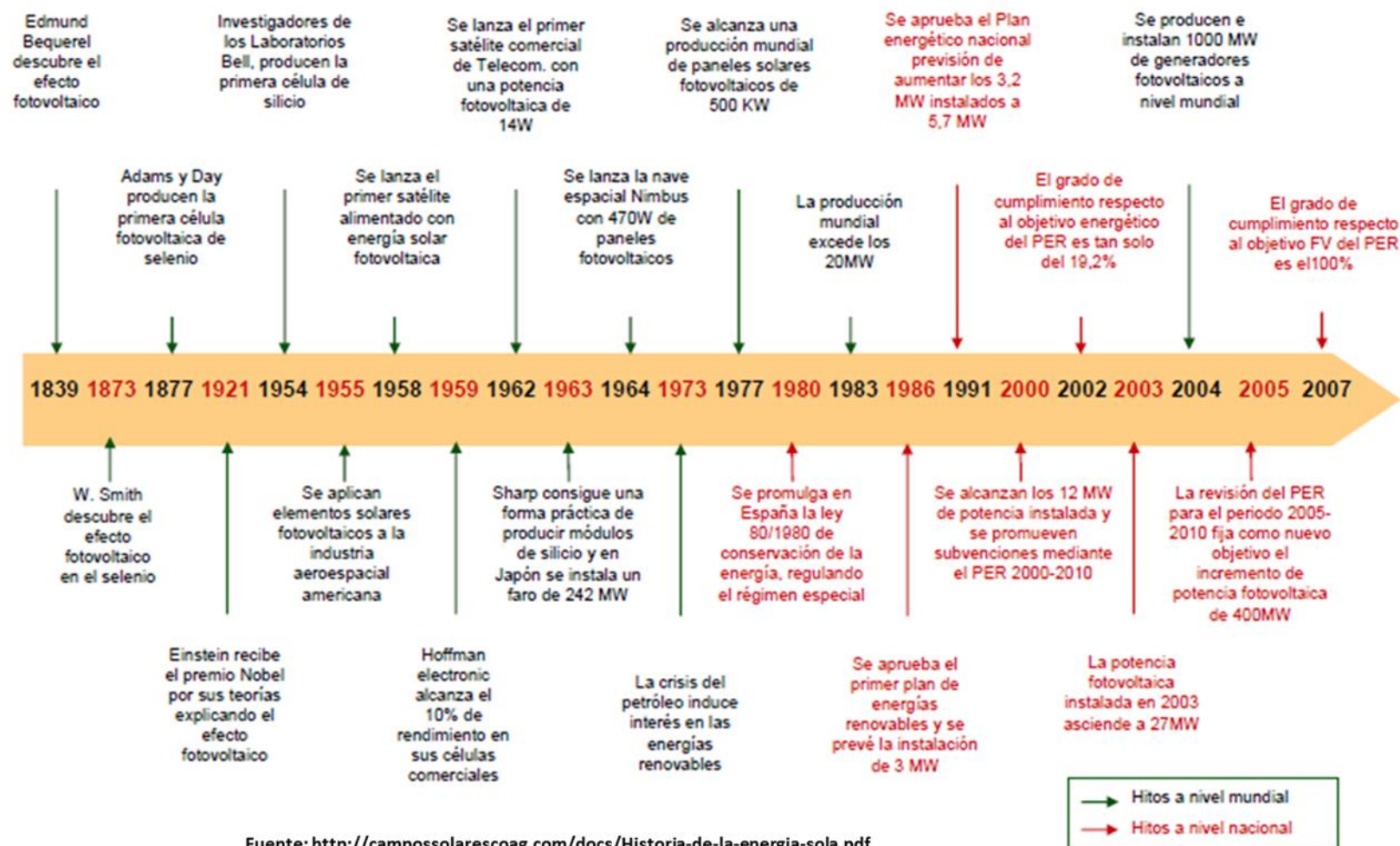
actuales como la lograda en 2007 de 2000 MW de módulos fotovoltaicos, con progresos significativos en las celdas.

De acuerdo con estudios realizados: “Covering 0.16% of the land on earth with 10% efficient solar conversion systems would provide 20TW of power, nearly twice the world’s consumption rate of fossil energy.” (Mousazadeh, y otros, 2009).

La anterior afirmación muestra la importancia de analizar el progreso e historia de la energía solar fotovoltaica, puesto que permite contextualizar este tipo de energía renovable tan importante para el planeta.

Figura 2.2 Historia de la energía solar fotovoltaica

## Historia de la energía solar fotovoltaica.



Fuente: <http://camposolarescoag.com/docs/Historia-de-la-energia-sola.pdf>

En la actualidad, tenemos avances extraordinarios como:

“en Japón líder en tecnología fotovoltaica se ha desarrollado unas nuevas celdas solares con forma esférica y minúsculo tamaño entre 1 y 1,5 mm de diámetro, a diferencia de las celdas planas tradicionales de 72 mm. El avance podría suponer una revolución en la energía solar fotovoltaica.”

Figura 2.3 Nuevas formas de celdas solares. (Energía solar fotovoltaica, 2013).



Fuente: <http://www.energia-solar-fotovoltaica.info>

Esta tecnología, así como algunos otros desarrollos interesantes: células esféricas que pueden captar radiación difusa y en cualquier ángulo, celdas flexibles, paneles fotovoltaicos orgánicos que pueden ser usados como pintura o células solares de polímeros, baratos y

flexibles, se piensa usarlos en un futuro cercano para una arquitectura inteligente (arquitectónica), son evidencias de una promisoría era de la electricidad producida por energía solar directa. Ver Figura 2.3 Nuevas formas de celdas solares.

Otros adelantos importantes están relacionados con los sistemas combinados que muestran gran eficiencia: “The hybrid PV/T system technology would be an effective solution to utilize the energy at multi levels, which could improve the efficiency of solar energy utilizing. Compared to the forced circulation of water, the PV/T system under natural circulation of water has no pump in the system which takes more space and consumes extra energy.” (He, Zhang, & Ji, 2011).

### 2.2.2 En Colombia

Los estudios acerca de la utilización de energía fotovoltaica en Colombia surgieron a raíz de la difusión en los años 70 de los módulos fotovoltaicos, necesarios para alimentar sistemas de telecomunicaciones en el país, por empresas que empezaron a comercializar la tecnología fotovoltaica.



Hubo algunas compañías que fueron pioneras en este campo como: ENERTEC que luego se llamó ENERTECH (Energía Solar y Tecnología de Aguas) y SINGER SEWING MACHINE CO., que después sería ENERSSIN. Esta empresa inicia el negocio de la energía fotovoltaica hacia 1981 con un estudio de factibilidad.

Para ese entonces, TELECOM utiliza módulos fotovoltaicos para alimentar sus estaciones y programas de Telefonía Rural.

Una empresa como ARCO SOLAR INC., que luego fue comprada por SIEMENS GMBH, se convirtió en la proveedora de módulos de SINGER hacia 1990. ENERTECH comenzó a distribuir módulos de marcas alemanas y termina labores hacia 1988.

Hacia los años 80 una empresa llamada AEG Telefunken Colombia distribuye módulos de la República Federal Alemana. EDUARDOÑO es otra firma que comienza a distribuir módulos fotovoltaicos importados desde el Japón cuyo proveedor es KYOCERA CORPORATION DURESPO S.A.

En 1986 nace ENERTECH de la Costa, que se llamó posteriormente SOLAR CENTER. Hasta el momento la empresa ha venido brindando sus servicios de asesoría y suministro de componentes, sistemas y accesorios para plantas solares en general.

Hacia 1988 se crea COLFOTON S.A. que se constituyen como distribuidores de módulos españoles ISOFOTON S.A. para los planes de Telefonía Rural, finalizando sus actividades en 1993.

En 1990 se inician empresas como MULTIELECTRÓNICA S.A., SOLAR Y ENERGÍA INTEGRAL ANDINA E.M.A. S.A. cuyas actividades iban encaminadas a la utilización de módulos españoles y realizando proyectos con módulos fotovoltaicos marca SOLAREX.

Actualmente, las empresas: ENERSSIN, SOLAR CENTER, MULTIELECTRÓNICA S.A., DURESPO S.A., EDUARDOÑO y ENERGÍA INTEGRAL ANDINA continúan trabajando con el aprovechamiento de la energía fotovoltaica.

Desde la perspectiva de la demanda de tecnología solar fotovoltaica en Colombia, se inicia en 1979 con la utilización de módulos marca Arco Solar de 23 Wp por parte de la Empresa Nacional de Telecomunicaciones, en un proyecto que inició con una capacidad instalada de 31809 Wp, cuyo beneficio fue para 847 localidades del país que no se encontraban interconectadas eléctricamente. Actualmente, Telecom usa sistemas fotovoltaicos en lugares no electrificados debido a su programa de telefonía rural. También se han usado sistemas residenciales, protección catódica, radio ayudas, etc. En el caso de los sistemas individuales son los instalados en viviendas particulares y fincas privadas apartadas con módulos fotovoltaicos que sólo cubren la zona privada.

Otros usuarios de los sistemas fotovoltaicos son las estaciones repetidoras de microondas, estaciones de televisión, sistemas de comunicación rural, iluminación pública, electricidad para escuelas rurales, radio, cercas eléctricas, pequeños sistemas de bombeo de agua y neveras para vacunas. Algunos otros usuarios utilizan estos sistemas donde han realizado proyectos para beneficio de comunidades como por ejemplo: Ministerio de Minas y Energía, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Palmas del Casanare, Instituto Colombiano de Energía Eléctrica, Plan Nacional de Rehabilitación, etc. Ecopetrol viene utilizando módulos fotovoltaicos para la protección catódica de sus oleoductos.

La anterior información se obtuvo del documento: Censo y evaluación de sistemas solares fotovoltaicos instalados en Colombia, editado por el Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA) de 1996. El documento aclara que parte de la información suministrada está incompleta debido a que algunas entidades privadas y del Estado colombiano, por razones de seguridad, no ofrecen datos más profundos sobre sus sistemas de energía.

En la actualidad, se adelantan proyectos importantes de gran envergadura para lograr el acceso de las poblaciones no interconectadas de Colombia, a la electricidad y las comunicaciones. A través de organismos como el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE), se realizan planes de cobertura con energías renovables para solucionar problemas de abastecimiento.

“Para cumplimiento de las funciones en esta materia, la UPME abordó labores de divulgación, promoción, planeación e institucionales, encaminadas principalmente a definir y poner en práctica la cultura de URE en los diferentes sectores y su aplicación a algunas actividades en las cuales participa directamente el Estado.” (IPSE, 2007). La importancia de estas iniciativas se eleva con aportes como: “Solar desalination systems are approaching technical and cost viability for producing fresh-water, a commodity of equal importance to energy in many arid and coastal regions worldwide. Solar photovoltaics (PV) represent an ideal, clean alternative to fossil fuels, especially for remote communities such as grid-limited villages or isolated islands.” (Al-Karaghoul, Renne, & Kazmerski, 2010).

### **2.2.3 Energía fotovoltaica en Bogotá**

De acuerdo con estudios realizados en varias ciudades colombianas, Bogotá hace parte de aquéllas que han estado más involucradas en el uso de la energía solar, térmica y fotovoltaica. Inicialmente, se implementaron sistemas para el uso de la energía solar térmica: “El desarrollo alcanzado hasta 1996 indicaba que se habían instalado 48.901 m<sup>2</sup> de calentadores solares, principalmente en Medellín y Bogotá, y en barrios con financiación del Banco Central Hipotecario.” (Rodríguez, 2008).

Los sistemas fotovoltaicos dependen de la radiación solar que incide sobre los paneles para generar energía y, en Bogotá, este recurso que fluctúa bastante se encuentra en un rango de 3.8 HSS (Horas Sol Standard) y 5.0 HSS, según lo indica el estudio realizado por investigadores de la Universidad Nacional de Colombia. (Hernández, Sáenz, & Vallejo, 2010).

Lo que también concluye este trabajo, es que Bogotá, “cuenta con un recurso solar adecuado para realizar dimensionamientos de sistemas fotovoltaicos residenciales interconectados”, pero falta apoyo por parte del gobierno para reducir los costos de inversión.

Por lo anterior, hacen falta investigaciones que muestren el potencial de Bogotá para el uso de la energía solar fotovoltaica tanto por parte de la academia, como por parte de la

industria, así como un mayor interés de las autoridades locales y nacionales, para generar incentivos que promuevan el uso de la fotovoltaica en la ciudad.

## **2.3 MARCO CONCEPTUAL:**

Desde la perspectiva de los recursos renovables, la literatura científica que se utiliza involucra nuevos términos que es necesario definir para evitar confusiones. En este sentido, se precisan algunos conceptos con base en libros de texto confiables como: Energías Renovables del doctor Mario Ortega Rodríguez, año de publicación 2000:

### **2.3.1 Energías renovables:**

“Podemos definir las energías renovables como aquéllas que son inagotables desde el punto de referencia del período de existencia de la humanidad, tengan o no su origen en el sol. Fuentes de energías renovables son la radiación solar, la atracción gravitacional de la luna y el sol, y el calor interno de la tierra.” (Ortega, 2000).

### **2.3.2 Radiación solar:**

“El sol está compuesto en un 90% de hidrógeno, un 7% de helio y un 3% del resto de elementos químicos. La energía se genera en el sol en un proceso nuclear de fusión por el que el hidrógeno solar se transforma en helio. El 0,73% de la materia se transforma en energía. Esta energía se manifiesta en forma de rayos gamma.” “El sol emite al espacio energía en forma de radiación electromagnética. La radiación electromagnética es una forma de transporte de energía que no requiere medio material para desplazarse”. (Ortega, 2000).

### **2.3.3 Efecto fotovoltaico:**

“El efecto fotovoltaico es la conversión directa, en un dispositivo llamado célula fotovoltaica, de radiación electromagnética en corriente eléctrica.” “La tecnología

fotovoltaica se basa en el fenómeno físico conocido como <<efecto fotovoltaico>>.” (Ortega, 2000).

#### **2.3.4 Biomasa:**

“El proceso fotosintético hace crecer la biomasa vegetal que, bien en la naturaleza, o bien mediante los ciclos naturales de cultivo establecidos por el hombre, produce materia orgánica.” “La biomasa vegetal se encuentra en la base de la pirámide trófica, siendo el alimento necesario de los animales para su crecimiento, de este modo se desarrolla la biomasa animal, que durante su metabolismo y al final de su ciclo de vida produce también residuos aprovechables energéticamente.”

#### **2.3.5 Energía eólica:**

La energía contenida en el viento que se utiliza especialmente para la generación de electricidad y el bombeo de agua.

#### **2.3.6 Energía hidráulica:**

La energía contenida en las caídas de agua que se utiliza especialmente para la generación de electricidad.

### **2.4 MARCO LEGAL:**

Otros conceptos importantes que constituyen el marco legal sobre uso de energías, los define la LEY 697 DE OCTUBRE 3 DE 2001 del Congreso de la República de Colombia así:

“El URE es el aprovechamiento óptimo de la energía en todas y cada una de las cadenas energéticas, desde la selección de la fuente energética, su producción, transformación,

transporte, distribución, y consumo incluyendo su reutilización cuando sea posible, buscando en todas y cada una de las actividades, de la cadena el desarrollo sostenible.” (Congreso de la República de Colombia, 2001).

#### **2.4.1 Uso eficiente de la energía:**

“Es la utilización de la energía, de tal manera que se obtenga la mayor eficiencia energética, bien sea de una forma original de energía y/o durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo de las diferentes formas de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad, vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.” (Congreso de la República de Colombia, 2001).

#### **2.4.2 Desarrollo sostenible:**

“Se entiende por desarrollo sostenible el que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de la vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades.” (Congreso de la República de Colombia, 2001).

#### **2.4.3 Aprovechamiento óptimo:**

“Consiste en buscar la mayor relación beneficio-costos en todas las actividades que involucren el uso eficiente de la energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.” (Congreso de la República de Colombia, 2001).

#### **2.4.4 Fuente energética:**

“Todo elemento físico del cual podemos obtener energía, con el objeto de aprovecharla. Se dividen en fuentes energéticas convencionales y no convencionales.” (Congreso de la República de Colombia, 2001).

#### **2.4.5 Cadena Energética:**

“Es el conjunto de todos los procesos y actividades tendientes al aprovechamiento de la energía que comienza con la fuente energética misma y se extiende hasta su uso final.” (Congreso de la República de Colombia, 2001).

#### **2.4.6 Eficiencia Energética:**

“Es la relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.” (Congreso de la República de Colombia, 2001).

#### **2.4.7 Fuentes convencionales de energía:**

“Para efectos de la presente ley son fuentes convencionales de energía aquellas utilizadas de forma intensiva y ampliamente comercializadas en el país.” (Congreso de la República de Colombia, 2001).

#### **2.4.8 Fuentes no convencionales de energía:**

“Para efectos de la presente ley son fuentes no convencionales de energía, aquellas fuentes de energía disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente.” (Congreso de la República de Colombia, 2001).

### **2.4.9 Energía solar:**

“Llámesse energía solar, a la energía transportada por las ondas electromagnéticas provenientes del sol.” (Congreso de la República de Colombia, 2001).

## **2.5 MARCO CONTEXTUAL**

### **2.5.1 Perfil radiométrico de Bogotá**

La región donde se realiza el estudio es la ciudad de Bogotá, Colombia. Se han obtenido datos importantes sobre el comportamiento de las variables radiométricas de Bogotá, donde se muestran las condiciones reales de la ciudad sobre energía solar.

Según un estudio realizado por La Universidad Nacional, el Instituto de Asuntos Nucleares y el Himat, sobre el “perfil radiométrico de la ciudad de Bogotá”, se basó en las variables de radiación solar global, radiación solar difusa, brillo solar, lluvias, temperatura máxima y mínima y humedad relativa.(González, Rodríguez, Vélez, & Simbaqueva, 1982)

Las medidas se tomaron en “... la sede de la Fundación Universidad de América FUA, (en la base del cerro de Monserrate), en el Instituto de Asuntos Nucleares, IAN y en la estación del Himat del Aeropuerto Eldorado”, (González, Rodríguez, Vélez, & Simbaqueva, 1982), logrando obtener un perfil en dirección transversal de la ciudad.

Entre otros objetivos se quería: “establecer los rangos de energía solar máxima en la ciudad y la frecuencia de esos valores para saber si ciertas normas internacionales de control de calidad de colectores solares son aceptables para las condiciones de Bogotá.” (González, Rodríguez, Vélez, & Simbaqueva, 1982).

El problema inicial fue la calibración y ajuste de los piranómetros y, la “calibración de la electrónica asociada al registro de la información radiométrica.” (González, Rodríguez, Vélez, & Simbaqueva, 1982).



Para el registro de los datos se tuvo en cuenta el hecho de que los piranómetros registran la potencia instantánea durante el día, lo cual debe integrarse con el tiempo en una gráfica para obtener la energía solar diaria.

“La radiación solar global es mayor (durante los meses analizados) en la localidad de IAN, manteniéndose entre 4,1 y 5,5 Kwh/m<sup>2</sup> día.” (González, Rodríguez, Vélez, & Simbaqueva, 1982).

“En las otras localidades FUA e HIMAT, la radiación es muy parecida siendo ligeramente mayor en el Aeropuerto Eldorado (HIMAT). Su rango de fluctuación está entre 3,2 y 4,6 Kwh/m<sup>2</sup> día.

La radiación solar en Bogotá se vio afectada por las características geográficas de la ciudad; por ejemplo, en el FUA, la radiación es bloqueada por largo tiempo por las montañas, también incide la humedad del ambiente generado por vientos y vegetación; esto hace que la radiación difusa tenga un porcentaje alto del 70% con respecto a la global. En la estación de IAN, la radiación difusa disminuye estando por debajo de un 40% de la global. Así mismo, la estación del HIMAT tiene una radiación difusa entre el 45 y 50% de la global.

Cifras como las que mencionan Ibáñez y otros investigadores, (Ibáñez Plana, Rosell Polo, & Urrutia, 2005), cobran una importancia inusitada en momentos de crisis como la actual:

- Cada 10 días, la Tierra es bañada por radiación solar equivalente en términos energéticos a todas las reservas conocidas de petróleo, gas y carbón.
- Sólo con el aprovechamiento del 1% de este recurso se lograría cubrir la demanda mundial de electricidad.
- Un metro cuadrado de captador solar permite producir al año entre 1.000 y 1.500 kWh de energía térmica, que pueden ser aprovechados con dispositivos de concentración a temperaturas elevadas entre 500 y 1.500°C.

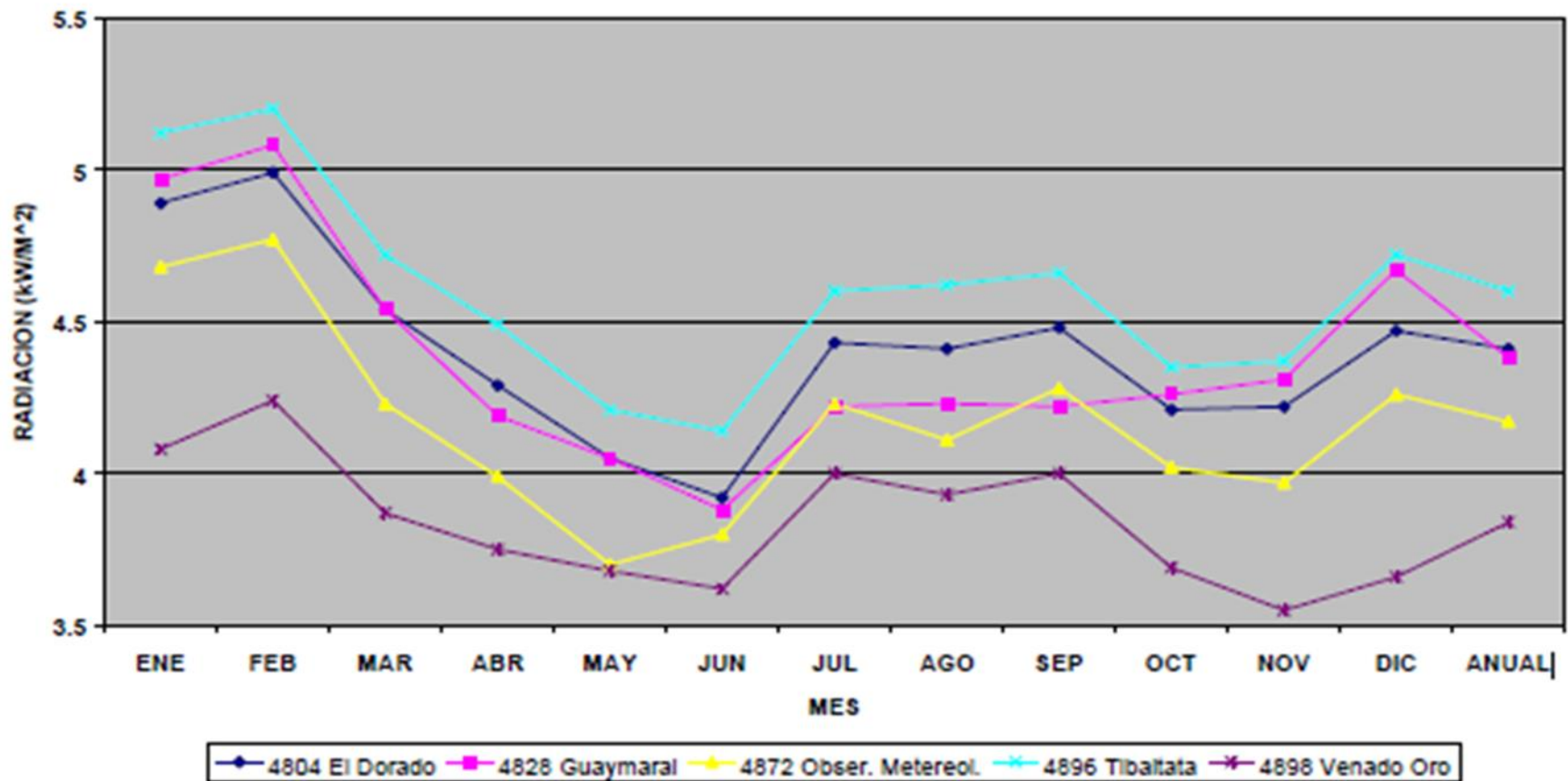
- La energía que irradia el Sol llega a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas. Explorar y definir ondas electromagnéticas es fundamental para entender el comportamiento de dichas ondas en cada región del mundo. En este sentido, se sabe que la Distribución espectral de la radiación solar, se comporta como un cuerpo negro.
- La Tierra recibe en el exterior de su atmósfera una potencia total de  $1.73 \times 10^{14}$  kW.

Se presenta a continuación una gráfica de la radiación solar en Bogotá durante el año, donde puede evidenciarse que el valor más alto medido está en el mes de febrero, con un pico entre 5.0 y 5.5 kWh/m<sup>2</sup> y, el valor más bajo se registra en noviembre con un pico entre 3.5 y 4.0 kWh/m<sup>2</sup>.

Ver Figura 2.4 Radiación solar en Bogotá.

Un aspecto interesante de la radiación en nuestro territorio es compararla con otros países, el caso de Chipre es significativo, puesto que es un país que se encuentra por encima de la zona Torrida, pero tiene condiciones climáticas parecidas al territorio colombiano, lo que significa que la experimentación con sistemas fotovoltaicos en ese país tiene parecidas conclusiones a las que podrían obtenerse en Colombia: “The key to successful integration of photovoltaic systems is to have knowledge of their performance and potential under the climatological conditions of any particular location. The high energy yield and performance results of the different PV systems installed in Cyprus clearly indicate that such technologies can have a major impact and potential as an integral part of the future energy mix of Cyprus.” (Makrides, Zinsser, Georghiou, Schubert, & Werner, 2010).

Figura 2.4 Radiación solar en Bogotá



Fuente: [www.corpoema.com/CDenergia/H\\_Cap9\\_Princ.Ciudades.PDF](http://www.corpoema.com/CDenergia/H_Cap9_Princ.Ciudades.PDF)

## ***CAPÍTULO III PANORÁMICA DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA (Estado del arte)***

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

Se realiza una visión general de la importancia de la energía que llega al planeta como radiación electromagnética y sus principales características. Se plantean esquemas sobre los usos de la energía solar. Por otro lado, se analizan cifras sobre los recursos naturales en Colombia para mostrar el potencial nacional. Luego, se muestra en términos generales y con cifras, la situación de la energía eléctrica en Colombia y el mundo.

Se muestran algunos estudios nacionales e internacionales, sobre el interés en el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica y superar problemas de abastecimiento de energía eléctrica en el país y en el mundo.

### **3.2 EL RECURSO SOLAR**

Considerado como el “astro luz”, nuestra estrella más cercana, El Sol, es la fuente más importante de energía que tiene el planeta Tierra. Todos los procesos biológicos, vegetales, animales y humanos de reproducción y evolución dependen directa o indirectamente de la radiación solar.

Uno de los logros más sorprendentes de la ciencia actual, es que podemos deducir las características más importantes de los objetos que se encuentran a grandes distancias de nuestra analítica vista, como El Sol, aquél astro cuya luminosidad no nos permite mirarlo directamente, pero con la ayuda de telescopios y satélites, hemos podido comprender su constitución.

Los datos obtenidos por los científicos muestran que nuestro Sol es “algo más que una estrella” como diría el Doctor Manuel Vázquez Abeledo, investigador del Instituto de Astrofísica de Canarias quien hace un extensivo trabajo sobre El Sol, mostrando la importancia de su estudio. Esboza como fundamentales, tres razones que se comparten por la autora de esta tesis, primero:

“El Sol es la estrella que tenemos más cerca y, por lo tanto, la que podemos estudiar con más detalle.” Segundo: “El Sol es un gran laboratorio” de observación de fenómenos energéticos bajo condiciones que sólo pueden observarse allí. Tercero: “El Sol es la fuente de energía para la mayoría de los procesos que tienen lugar en la atmósfera y superficie terrestre...”. (Vázquez, Abeledo, 2004)

Explorando un poco estas razones, en primer lugar, se tienen los datos más importantes sobre la constitución del Sol (Wikipedia) Ver Tabla 3.1 Datos sobre la constitución del Sol:

**Tabla 3.1 Datos sobre constitución del Sol**

Datos derivados de la observación terrestre	
Distancia media desde la Tierra	149.597.871 km ( $\sim 1,5 \times 10^{11}$ m)
Brillo visual (V)	-26,8 <sup>m</sup>
Diám. angular en el perihelio	32' 35,64"
Diám. angular en el afelio	31' 31,34"

Características físicas	
Diámetro	1.392.000 km ( $\sim 1,4 \times 10^9$ m)
Diámetro relativo (d <sub>s</sub> /d <sub>r</sub> )	109
Superficie	$6,09 \times 10^{12}$ km <sup>2</sup>
Volumen	$1,41 \times 10^{18}$ km <sup>3</sup>
Masa	$1,9891 \times 10^{30}$ kg
Masa relativa a la de la Tierra	332946x
Densidad	1411 kg/m <sup>3</sup>
Densidad relativa a la de la Tierra	0,26x
Densidad relativa al agua	1,41x
Gravedad en la superficie	274 m/s <sup>2</sup> (27,9 g)
Temperatura de la superficie	$6 \times 10^3$ K
Temperatura de la corona	$5 \times 10^6$ K
Temperatura del núcleo	$\sim 1,36 \times 10^7$ K
Luminosidad (L <sub>s</sub> )	$3,827 \times 10^{26}$ W

Características orbitales	
Periodo de rotación	
En el ecuador:	27d 6h 36min
A 30° de latitud:	28d 4h 48min
A 60° de latitud:	30d 19h 12min
A 75° de latitud:	31d 19h 12min
Periodo orbital alrededor del centro galáctico	$2,2 \times 10^8$ años

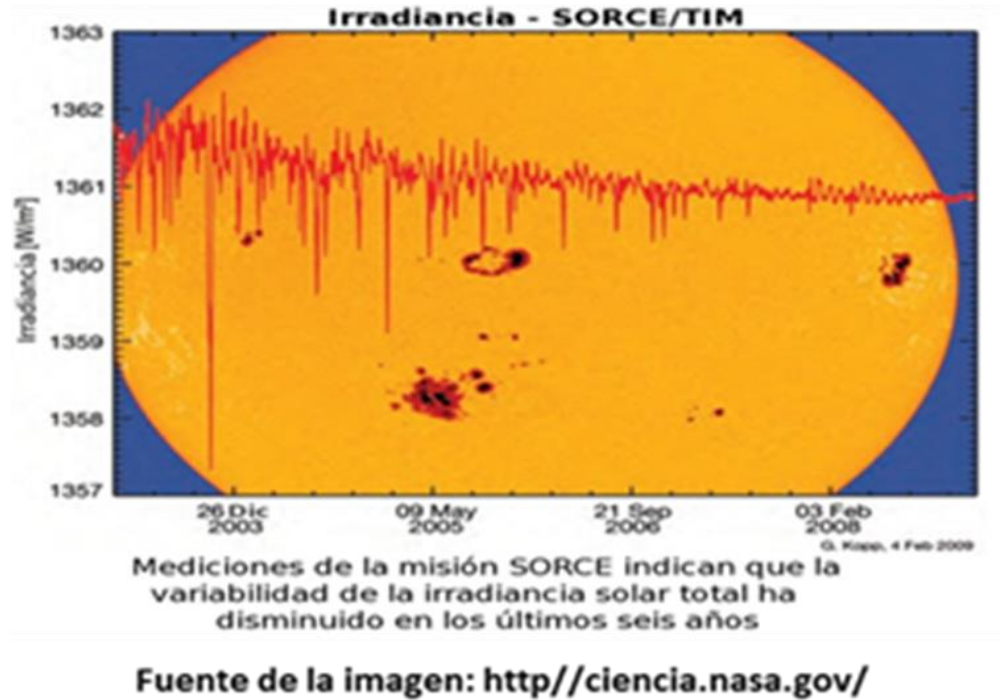
Composición de la fotosfera	
Hidrógeno	73,46%
Helio	24,85%
Oxígeno	0,77%
Carbono	0,29%
Hierro	0,16%
Neón	0,12%
Nitrógeno	0,09%
Silicio	0,07%
Magnesio	0,05%
Azufre	0,04%

Algunos de los datos anteriores más sobresalientes muestran que el Sol es, indudablemente, la masa y la energía más importante del Sistema Solar que influencia a la Tierra, por ejemplo: la distancia que nos separa ( $\sim 1,5 \times 10^{11}$  m), considerada como la unidad astronómica, permite que la Tierra se encuentre a la distancia ideal para la incubación de cantidad de procesos biológicos, químicos y físicos, generados por la influencia de la radiación solar; si la distancia de la Tierra al Sol fuera mayor o menor, posiblemente las condiciones para el surgimiento de la vida serían muy diferentes, lo cual dificultaría su evolución, tal como sucede con Venus (más cerca) y Marte (más lejos), aunque de éste último, se dice que puede tener condiciones para el desarrollo de la vida; aún faltan pruebas por analizar para concluir si en Marte puede prosperar la vida.

Toda la energía que el Sol irradia hacia el espacio exterior, se encuentra en forma de ondas electromagnéticas que van desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. En el siguiente gráfico podemos observar la irradiancia del Sol, (Ver Figura 3.2 Radiación solar) medida por la Nasa en los últimos seis años (desde el 2003 hasta el 2008), concluyendo que ha disminuido. Estos datos han sorprendido a los científicos puesto que se creía que la irradiancia del Sol, era constante, pero lo real es que va al ritmo del ciclo de las manchas solares.

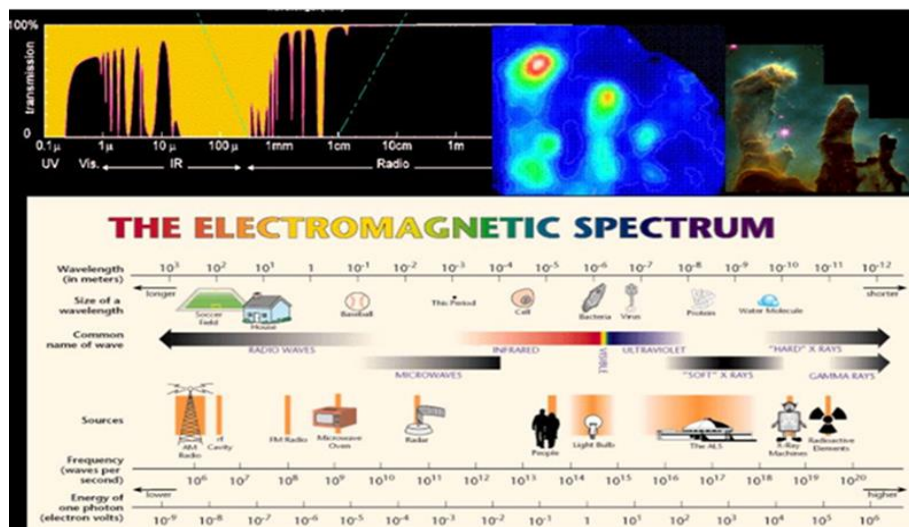
Esta conclusión es muy importante porque explica muchos cambios climáticos en nuestro planeta, condiciona el comportamiento de la magnetosfera terrestre e influencia de forma directa, el ciclo vital de nuestros ecosistemas.

Figura 3.2 Radiación solar



La radiación solar nos llega en forma de ondas electromagnéticas en un amplio espectro de longitudes de estas ondas, frecuencias y colores. La siguiente gráfica muestra una representación del espectro electromagnético. Ver Figura 3.3 Espectro electromagnético.

Figura 3.3 Espectro electromagnético



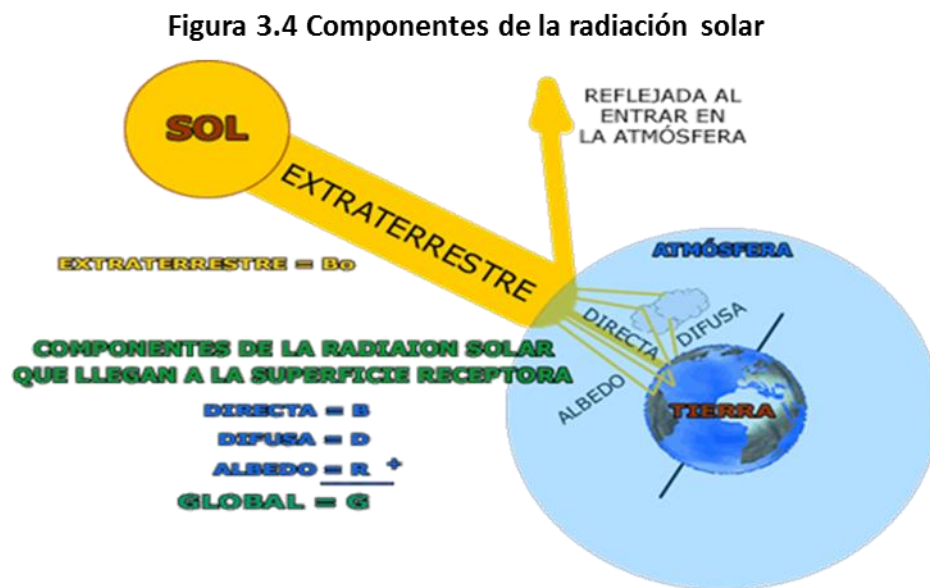
Fuente de la imagen: [astronomos.cl](http://astronomos.cl)



Se puede observar que el espectro electromagnético puede analizarse de varias formas: como longitudes de ondas que pueden ir desde  $10^3\text{m}$  hasta  $10^{-12}\text{m}$ , cuyo tamaño puede representarse por diferentes objetos; se puede analizar como recurso de acuerdo con la frecuencia asociada a las ondas y la energía que transportan.

Esta energía que transporta el espectro de luz, es medida en fotones por medio de la relación  $E = h\nu = \frac{hC}{\lambda}$ , donde  $h$  es la constante de Planck,  $\nu$  la frecuencia,  $C$  la velocidad de la luz y  $\lambda$  la longitud de la onda. (Labouret & Villos, 2008).

Ahora, la radiación solar se clasifica de acuerdo con la forma en que llega a nuestro planeta, en la siguiente gráfica se representa. Ver Figura 3.4 Componentes de la radiación solar.



Fuente de la imagen:

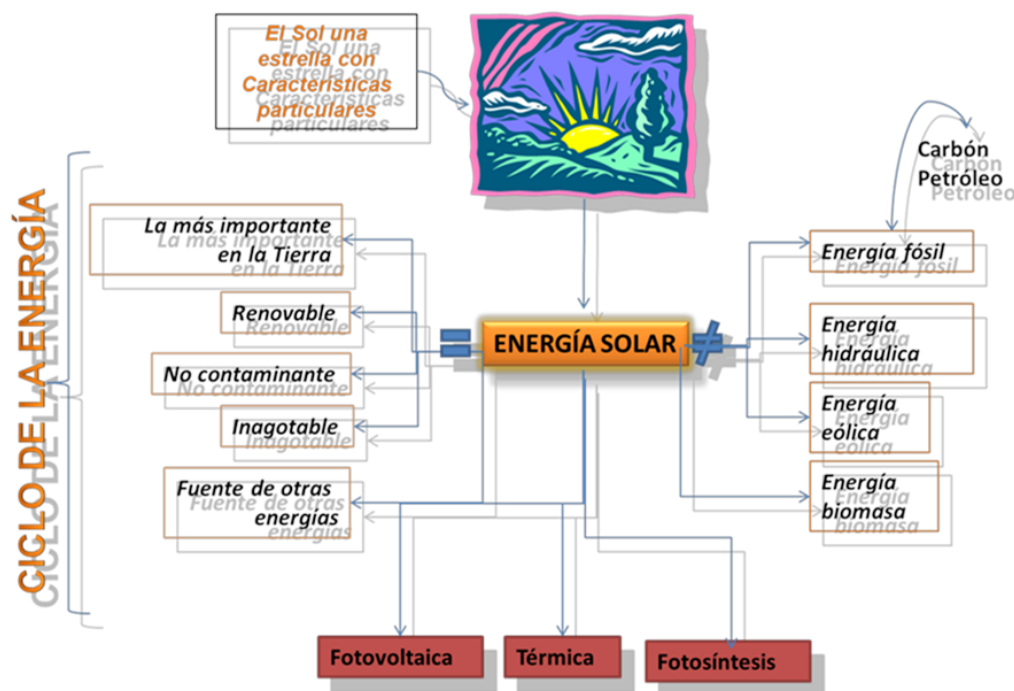
[http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/02\\_radiacion/01\\_basico/2\\_radiacion\\_08.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/01_basico/2_radiacion_08.htm)

La radiación total que puede obtenerse es la suma de tres formas en que la Tierra la recibe (Labouret & Villos, 2008):

- Radiación directa: es la que recibe el planeta sin que sea difuminada por la atmósfera.
- Radiación difusa: es la que se difumina por la atmósfera y otros factores como las nubes, las gotas de agua, el polvo y los aerosoles.
- El albedo: es la que llega producto de la reflexión sobre el suelo y depende de las condiciones meteorológicas del lugar.

Esta energía que viene en forma de radiación es muy rica, se caracteriza porque puede usarse de muy diversas formas, tanto en la naturaleza, como para fines industriales y de consumo, en general. En el siguiente esquema se resumen los usos más importantes. (Ver Figura 3.5 Usos de la energía solar).

Figura 3.5 Usos de la energía solar



Fuente: propia

Desde este punto de vista, la energía solar se considera como la reina de las energías por las características que se describen en la figura anterior. En forma directa, la energía solar puede ser transformada en térmica a través de colectores solares, en fotovoltaica con paneles solares y en fotosíntesis a través de las plantas. Las otras formas de la energía son posibles, gracias a la transformación de la energía solar o su incidencia en los fenómenos naturales. Es el caso de la energía eólica, cuya fuente son los vientos; la energía de la biomasa que utiliza los desechos orgánicos para generar entre otros productos, gas para las estufas; la energía hidráulica que utiliza las caídas de agua para generar electricidad y la energía fósil cuyo proceso conocemos.

Como señala Sixto Guevara Vásquez:

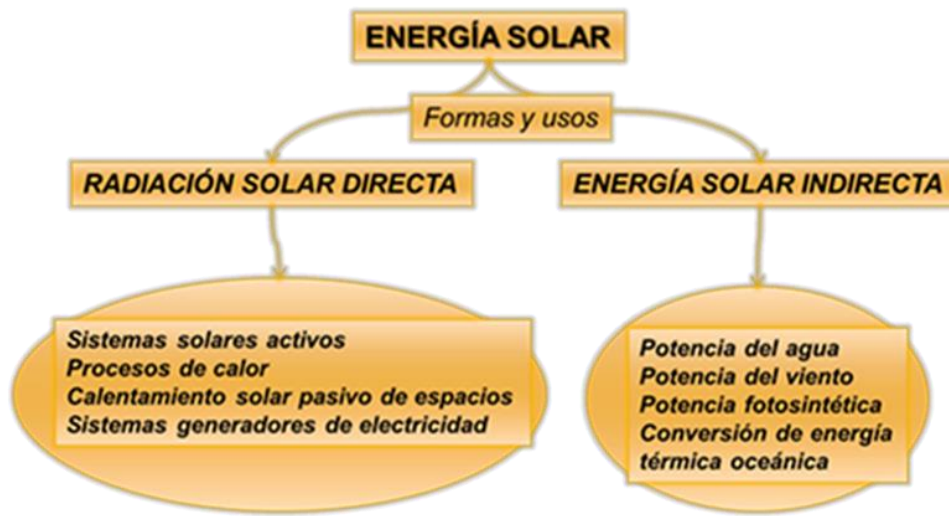
“El aprovechamiento de la energía solar está condicionado a la intensidad de la radiación solar incidente sobre un área determinada, por lo que es necesario contar con registros de radiación confiables que puedan emplearse en el diseño de equipos que aprovechen la energía solar.” (Guevara Vásquez, 2003).

Es necesario aclarar que el uso de los aparatos en la medición de la radiación es un factor que incide en la exactitud de la toma de datos, debido a la incertidumbre que maneja cada tecnología. Adicionalmente, los estándares contra los cuales se confrontan los datos tomados, también están sujetos a cierta incertidumbre porque dichas medidas se refieren, generalmente, a extensiones de terrenos muy bastas.

Existen mapas y tablas de radiación solar que han sido obtenidos con datos de satélite. En nuestro país se cuenta con los mapas de radiación solar de Colombia, generados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Otros usos de la energía solar están relacionados con nuevas formas de ver la arquitectura y el diseño en ciudades y campos. (Ver Figura 3.6 Energía solar, otros usos).

Figura 3.6 Energía solar, otros usos



Fuente: propia

*Los sistemas solares activos:* corresponden a aquellos que reciben la luz solar y la transforman directamente en energía eléctrica.

*Los sistemas solares pasivos:* aprovechan la energía solar desde la posición de las casas, edificios, ventanas, lugares en general, donde llega la luz.

La arquitectura sustentable o arquitectura bioclimática es una forma de conjugar la construcción urbana y rural con los elementos del clima, la radiación solar, el viento, la lluvia, etc., de tal manera que, estos elementos se incorporen a los edificios para aprovechar la energía y disminuir los costos de consumo y el impacto ambiental del uso de los recursos fósiles. Ver Figura 3.7 Arquitectura bioclimática.

Figura 3.7 Arquitectura bioclimática



Fuente de la imagen: aragonsostenible.blogia.com

### **3.3 EL RECURSO SOLAR EN EL MUNDO (INVESTIGACIONES)**

#### **3.3.1 Universidad del estado de Colorado (USA)**

El sol es un generador de energía fotovoltaica, una fuente económica de energía renovable que puede ayudar a reducir la dependencia de combustibles fósiles. La energía fotovoltaica tiene el potencial para satisfacer las mayores necesidades de energía del mundo (para siete billones de personas, de las cuales, un tercio viven sin electricidad).

El profesor W.S. Sampath y su grupo de investigación del laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Estado de Colorado han desarrollado y manufacturado una tecnología para producir eficientemente celdas solares. El costo de la manufacturación tiene el potencial de ser menor que U\$ 1 por vatio de electricidad generada, competitiva con los métodos actuales de generación de electricidad en la mayor parte de los Estados Unidos y el mundo. ( Sampath , 2011).

#### **3.3.2 Universidad de Alicante**

En la Universidad de Alicante existe el Centro de Tecnología Química (CTQ) cuyo propósito es realizar investigación en el área de “sistemas electroquímicos alimentados con energía solar”, que relaciona dos tipos de energía no contaminantes: la electroquímica con la solar. El CTQ cuenta con una planta fotovoltaica, cedido por el Ayuntamiento de Alicante, para ser administrada por la universidad.

Algunos de los propósitos de investigación son: desalinización de agua por electrodiálisis, cloración de agua, tratamiento de aguas residuales, etc. Estos proyectos utilizan los paneles fotovoltaicos como fuente de energía eléctrica para cada proyecto y también, para fines educativos con los estudiantes.

En el Parque Científico de Alicante, se instaló una Central Fotovoltaica con un tamaño de kW en un área de 2600 m<sup>2</sup> aprox., como resultado de un convenio entre la Caja de Ahorros del Mediterráneo, la Empresa UNIÓN FENOSA y la Universidad de Alicante con el objetivo de promover la investigación en la energía solar fotovoltaica. Las características

del sistema instalado son: Ver Tabla 3.1 Características de la Central Fotovoltaica de Alicante.

**Tabla 3.2 Características de la Central Fotovoltaica de Alicante**

Paneles		Potencia	Estructuras
Monocristalinos y policristalinos	y	73,81 kWp	Fijas
Amorfos		10 kWp	Fijas
Monocristalinos y policristalinos	y	19,8 kWp	Móviles bidireccionales
Inversores		3,8 kW, 5 kW, 6 kW para potencia de diseño de 100000 W	
Equipos de medición y monitorización			En tiempo real

### 3.3.3 Escogiendo las energías renovables

En el reporte hecho por John Gulland y Wendy Milne ( Gulland & Milne, 2008) se presenta la línea de frontera de nuestra transición hacia las energías renovables basando sus aplicaciones en el hogar, en donde señala el propio autor John que utiliza la madera en su casa para calentarse. En el pasado las compañías petroleras destinaban por cada 100 barriles de producción uno para la investigación, hoy esa relación es de 10 – 1, en donde están convencidos de su remplazo, dado que las reservas no serán fáciles de encontrar ni baratas.

Aunque para John el interés por la energía es más social, su relación de la energía con las personas, la política, la economía y el ambiente, también es importante. Además piensa que su proyecto de independencia de energía para el hogar nunca será completo, pues en su región, Ontario (Canadá), las condiciones no son las más favorables; el promedio anual de radiación solar en horas está alrededor de 1800, que es cerca del 40 % de la luz del día, aunque es bajo comparado con otras regiones.

### 3.3.4 Nuevas tecnologías, precios y competencia

Según el reporte hecho por Maria Burke (Burke, 2008) del presente año en el que resalta la labor en la que ha contribuido la tecnología para disminuir los costos de la energía solar, en el EPI (Earth Policy Institute) la producción de celdas solares o fotovoltaicas en el mundo para el año 2007 creció un poco más del 50% respecto al año anterior predominando Japón seguido por China, Alemania, Taiwán y USA. Este proceso se debe, según Jonathan Dorn del EPI, al cambio climático y los incentivos económicos.

En total la energía solar generada en el año 2007 fue de 4 GW que contabiliza solamente el 0.06% del consumo global de energía eléctrica (German Research Group Photon Consulting, 2007), y predice además que la capacidad anual superará los 20 GW para años posteriores.

La mayor razón por la cual la energía solar no ha sido un buen camino hasta ahora es los escasos materiales de polisilicio, que puede constituir hasta la mitad del costo de una celda fotovoltaica convencional. Las celdas de película delgada crecieron su porción en el mercado de 4% en el 2003 al 7% en el 2006 y, para Dorn, en los años siguientes será del 20%.

Ambas tecnologías tienen sus pros y sus contras. Los dispositivos de película delgada se hacen con deposiciones extremadamente delgadas de capas de silicio amorfo u otros materiales fotosensibles como aleaciones de Telurio Cadmio, Cobre – Indio – Galio sobre vidrio, metal o sustrato plástico. Generalmente ellos son más baratos aunque el costo de su producción puede ser más alto que el de las celdas convencionales.

Sin embargo, las celdas convencionales actualmente logran mejores eficiencias de conversión que las de su contraparte de película delgada. Esto significa que menos área es requerida para generar la misma cantidad de electricidad. El promedio en la eficiencia de conversión de una celda solar es aproximadamente 15 % - 17 % comparado con el 10 % de las de película delgada. Pero las celdas de película delgada son más flexibles y más delgadas. Nuevas tecnologías continúan en evolución, por ejemplo películas transparentes

pueden ser utilizadas como cortinas de pared que permiten pasar a través los destellos solares.

Los expertos en energía comentan que son varios los factores que ayudarán a estimular la gran demanda de energía solar y a encender la chispa del desarrollo de esta industria en el mundo. Investigaciones recientes han realizado desarrollos para obtener mayor eficiencia como la absorción de luz en celdas de película delgada a precios razonables como alternativa a las construidas con metales raros y caros. La estricta regulación ambiental es otro factor para disminuir la emisión de partículas derivadas de la combustión.

### **3.3.5 El caso de la India**

El reto de la India es para cumplirlo en el 2022, generar una cantidad de energía de 20.000 megavatios de energía solar, significa un aumento de 100 veces o más de la energía actual, durante los próximos 12 años.

A raíz del lanzamiento del programa: la Jawaharlal Nebru National Solar, la India por intermedio de su primer ministro quieren, en una primera fase, generar 1000 megavatios en todo el país, con las plantas solares instaladas; en la segunda fase 2000 megavatios al 2015, hasta llegar en 2022 alcanzar los 20000 megavatios.

La India es un país que ha venido avanzando en la investigación científica en varios frentes y comienza a consolidarse como una potencia en materia de tecnología espacial e informática. El uso de la energía solar es otro frente de acción que, seguramente elevará al país hacia nuevas formas eficientes de uso de la energía, para estar a tono con la emergencia internacional sobre la crisis energética.

La posición geográfica de la India, convierte al país en un lugar rico en energía solar. “El país recibe unos 5.000 trillones de kwh al año en toda su área y la mayoría de las zonas reciben 4-7 kwh por kilómetro cuadrado al día.” (Gupta, 2010). Ventaja grande considerando, de otro lado, los costos de obtención de dicha energía: “La industria actual



estima que producir una unidad de energía solar costará unas Rs. 17,50 lo que significa más del doble del coste de la producción de carbón.” (Gupta, 2010).

En la actualidad el costo inicial para implementar una planta de energía solar es de “Rs. 150 millones para 1 megavatio”, según el ministro de New and Renewable Energy, Farooq Abdullah.

Un inconveniente es que la demanda energética de la India está aún muy dependiente del consumo de carbón y el diésel y las perspectivas a corto plazo son el continuar con la importación de carbón para suplir las necesidades energéticas.

En este sentido, el programa de la India: “La misión solar India adoptará un enfoque de tres fases: abarcar el periodo que queda del XI Five Year Plan y el primer año del Plan XII (hasta 2012-2013) como fase 1; los restantes cuatro años del Plan XI (hasta 2012-2017) como fase 2 y el Plan XIII (2017-2022) como fase 3.” (Gupta, 2010).

Este programa estará apoyado con políticas de cambio de las unidades de energía, modernización tecnológica y apoyo a la fabricación con préstamos blandos.

Se contempla también el uso de otro tipo de nuevas tecnologías de iluminación como los leds, para iluminación pública y el incremento del uso de las cocinas solares que han tenido éxito en regiones como Shirdi, Rajasthan y Tirupati, generando entre 20 y 25 mil comidas diariamente.

### **3.4 El contexto nacional colombiano**

Desde el contexto nacional, según la CEPAL, el Plan Energético Nacional propone una serie de estrategias para el desarrollo energético en Colombia hasta el 2020. En especial, la Ley 691 de 2001 que incentiva la utilización de energías alternativas. Igualmente se creó una “Comisión intersectorial para el Uso Eficiente y fuentes no Convencionales de Energía,

CIURE” que tendrá como función principal coordinar la ejecución de políticas e incentivar programas.

En el estudio diagnóstico realizado por el Plan Energético Nacional se menciona que la energía más empleada es la hidroeléctrica a gran escala con un porcentaje del 65%. Se han implementado sistemas energéticos basados en paneles fotovoltaicos y colectores solares para calentamiento de agua en algunas regiones aisladas con una capacidad un poco mayor a 2 MW. Las fuentes renovables en Colombia brindan un 27,4% de la energía, destacándose las que corresponden a los biocombustibles con los productos de la caña de azúcar y la hidro-energía. Sin embargo, según el Plan Estratégico Nacional 2006-2025 (UPME, 2007):

“En Colombia, como consecuencia del modelo implementado y sin desequilibrio entre la oferta y la demanda de energía, se ha prestado poca atención al desarrollo de políticas exitosas dirigidas a incluir en la canasta energética el uso de fuentes no convencionales de energía y de programas de eficiencia energética, orientados al mejor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles.”

En este contexto, los esfuerzos gubernamentales comienzan a generar estrategias para mejorar el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía. En los últimos años el auge del uso de la energía solar fotovoltaica, ha jugado un papel importante como alternativa energética para las regiones no interconectadas del país y, son múltiples las experiencias que muestran sus beneficios.

Los sistemas fotovoltaicos comenzaron a implementarse para resolver problemas de telecomunicaciones en regiones apartadas del país, donde se mostró que era más económico colocar paneles solares que llevar la red eléctrica hasta esos sitios.

“Según un estudio realizado, entre 1985 y 1994 se importaron 48.499 módulos solares para una potencia de 2.05 MWp. De estos 21.238 módulos con una potencia de 843.6 kW en proyectos de telecomunicaciones y 20.829 módulos con 953.5 kWp

en electrificación rural. El estudio anterior también indicó, sobre una muestra de 248 sistemas (con 419 módulos), que 56% de los sistemas funcionaban sin problemas, 37% funcionaban con algunos problemas y 8% estaban fuera de servicio.” (Rodríguez Murcia, 2009).

El potencial energético solar en Colombia tiene las siguientes cifras. Ver Tabla No. 3.2 Potencial energético solar en Colombia (UPME-IDEAM, 2005):

**Tabla 3.3 Potencial energético solar en Colombia**

Región del país	Radiación Solar (kWh/m <sup>2</sup> /año)
Guajira	2 000 - 2 100
Costa Atlántica	1 730 - 2 000
Orinoquía-Amazonía	1 550 - 1 900
Región Andina	1 550 - 1 750
Costa Pacífico	1 450 - 1 550

Como puede observarse Colombia, por encontrarse en uno de los lugares del mundo donde la radiación es más perpendicular, la Zona Tórrida, posee un gran potencial energético en todas sus regiones, primando Guajira y Costa Atlántica por su clima tropical de baja nubosidad.

#### **3.4.1 Cifras sobre los recursos naturales en Colombia**

El siguiente análisis se realiza con base en la información y cifras ofrecidas por el Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia. Bosques 2009. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2011)

Colombia posee grandes extensiones de bosques. Se estima que el 60% del territorio nacional corresponde a zonas boscosas. Los bosques son la fuente principal de los ciclos

vitales en la naturaleza: el ciclo del carbono, el ciclo del agua, el hábitat de la mayoría de las especies, la conservación de los suelos, etc. De tal manera que, la estimación de este recurso y el aprovechamiento inteligente son fundamentales para la permanencia de la vida en el país, tanto la animal, vegetal, como la de la especie humana.

El Gobierno colombiano ha realizado convenios internacionales para la conservación y uso “racional” de los recursos de los bosques. Los más importantes se resumen en la siguiente tabla 3.3 Acuerdos internacionales relacionados con los bosques:

**Tabla 3.4 Acuerdos internacionales relacionados con los bosques**

Convención/acuerdo	Fecha de inicio en Colombia
Convención Internacional sobre Comercio de Especies de Fauna y Flora Silvestre Amenazadas de Extinción (CITES)	29-nov-81
Convenio Internacional de las Maderas Tropicales	27-mar-90
Convención sobre la Diversidad Biológica	29-dic-93
Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático	21-mar-94
Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional, especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas (RAMSAR)	18-oct-98
Convención Internacional de Lucha contra la Desertificación	5-sept-99

Estos convenios, en alguna medida, han permitido realizar estudios científicos y de diagnóstico sobre los recursos en Colombia, han mostrado la gran biodiversidad del país y, también han detectado los graves problemas de sobre explotación de los bosques, el tráfico de especies, la deforestación y el consecuente secamiento de ríos y fuentes hídricas, así como el deterioro ambiental general, debido a la falta de control sobre estos recursos.

Nace también la idea de la protección de los bosques y ecosistemas. Actualmente se encuentran siete zonas de reserva que constituyen una extensión de 51.376.621 hectáreas (45% del territorio continental del país). Se sitúan 101 cascos urbanos y 267 municipios; se muestran en la siguiente tabla 3.4 Zonas de Reserva Forestal de Ley 2ª de 1959:

**Tabla 3.5 Zonas de Reserva Forestal de Ley 2a de 1959**

Zona de reserva forestal	Área (ha)
Amazonia	37.844.524
Central	1.543.707
Cocuy	730.389
Pacífico	8.010.504
Río Magdalena	2.155.591
Serranía de los Motilones	552.691
Sierra Nevada de Santa Marta	539.215
<b>Total</b>	<b>51.376.621</b>

Fuente: MAVDT & IDEAM, 2005

Gran parte del éxito en el uso de las energías renovables tiene que ver con: “Much of the progress made on renewable electricity costs comes from the efforts of policy makers to support the development of renewable electricity technology, either through direct means such as government-sponsored research and development (R&D), or by enacting policies that support the production of renewable electricity, such as renewable energy certificates and feed-in tariffs” (Popp, Hascic, & Medhi, 2009).

### 3.4.2 Sistemas solares en Colombia

En las conclusiones de un estudio, (Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, INEA, 1996) que tuvo como puntos fundamentales de investigación, las ciudades de Bogotá, Cali, Manizales y Medellín, se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos: fabricantes y empresas, sistemas solares térmicos instalados, satisfacción de los usuarios, evaluación de los sistemas térmicos, ahorro energético debido al uso de la energía solar.

En el primer aspecto, se obtuvieron las siguientes cifras. Ver Tabla 3.5 Ciudades, empresas y sistemas instalados.

**Tabla 3.6 Ciudades, empresas y sistemas instalados**

CIUDAD	NÚMERO DE EMPRESAS	%
Bogotá	15	53.6
Cali	6	21.4

<b>Manizales</b>	<b>2</b>	<b>7.1</b>
<b>Medellín</b>	<b>5</b>	<b>17.9</b>
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>100</b>

Estos datos son obtenidos por ciudad, 1993.

El censo arrojó la cifra de 50 empresas registradas en energía solar, un 50% de ellas, fabrica y/o comercializa SST, mientras que el otro 50% comercializa sistemas fotovoltaicos. En el segundo aspecto sobre censo y caracterización de sistemas solares térmicos, se obtuvo lo siguiente. Ver Tabla 3.6 Censo de sistemas solares térmicos.

**Tabla 3.7 Censo de sistemas solares térmicos**

<b>CIUDAD</b>	<b>M<sup>2</sup> DE INSTALACIÓN</b>	<b>%</b>
<b>Bogotá</b>	<b>31.596.5</b>	<b>64.6</b>
<b>Cali</b>	<b>2.480</b>	<b>5.1</b>
<b>Manizales</b>	<b>798.8</b>	<b>1.5</b>
<b>Medellín</b>	<b>9.820</b>	<b>20.1</b>
<b>Otros 1</b>	<b>924.8</b>	<b>1.9</b>
<b>Otros 2</b>	<b>3.280.9</b>	<b>6.7</b>
<b>Total</b>	<b>48.901</b>	<b>100</b>

*Otros 1:* grupo conformado por ciudades como: Palmira, Pereira, Armenia, Ibagué, Píede Cuesta, Popayán, Montería, Buga, Anapoima.

*Otros 2:* ciudades como: Cota, La Calera, Sopó, Tabio, Subachoque, Tenjo, Cajicá, Zipaquirá, Tunja, Sogamoso.

En la siguiente tabla se encuentra la evolución histórica del área instalada para los SST de uso doméstico en Colombia, 1993. Ver Tabla 3.7 Evolución del área instalad para los SST.

**Tabla 3.8 Evolución del área instalad para los SST**

<b>AÑO</b>	<b>ÁREA (m<sup>2</sup>)</b>
<b>1979</b>	<b>1.150</b>
<b>1980</b>	<b>1.902</b>
<b>1981</b>	<b>4.375</b>
<b>1982</b>	<b>652</b>
<b>1983</b>	<b>Sin información</b>
<b>1984</b>	<b>4.000</b>
<b>1985</b>	<b>4.863</b>

1986	1.200
1987	2.676
1988	3.210
1989	278
1990	3.120
1991	1.399
1992	898
1993	1.334

En las cifras anteriores se relacionan los sistemas solares térmicos instalados y las cifras más altas corresponden a planes de vivienda que utilizan energía solar. El número de sistemas solares térmicos instalados por ciudad se relacionan a continuación; se observa que el mayor porcentaje lo tiene Bogotá con un 90.6% del total instalado. Ver Tabla 3.8 SST instalados en Bogotá.

**Tabla 3.9 SST instalados en Bogotá.**

CIUDAD	No.	%
<b>Bogotá</b>	7.903	90.6
<b>Cali</b>	292	3.3
<b>Manizales</b>	164	1.9
<b>Medellín</b>	250	2.9
<b>Otros</b>	114	1.3
<b>Total</b>	<b>8.724</b>	<b>100</b>

Se realizó una estimación del ahorro en energía eléctrica y del potencial de ahorro en cada ciudad; los datos se relacionan en la siguiente tabla. Ver Tabla 3.9 Ahorro de energía eléctrica en varias ciudades.

**Tabla 3.9 Ahorro de energía eléctrica en varias ciudades**

CIUDAD kwh/mes	AHORRO (1) kwh/mes	AHORRO (2) POTENCIAL	AHORRO (3) REAL %	AHORRO
<b>Bogotá</b>	407.282	480.862	81.8	587.763
<b>Cali</b>	20.125	20.196	95.7	21.100
<b>Medellín</b>	58.153	62.657	65.0	96.329
<b>TOTAL PAÍS</b>	<b>485.560</b>	<b>563.715</b>	<b>79.9</b>	<b>705.192</b>

Los números entre paréntesis de los ítems de ahorro corresponden a los métodos de obtención del ahorro energético que involucra de tres tipos diferentes:

- 1) Energía solar incidente sobre el área instalada por ciudad, eficiencia de consumo y del sistema.
- 2) Diferencia entre el consumo de energía de los usuarios de energía solar y los que no la usan (grupo de control).
- 3) Estimación del potencial de ahorro energético en calentamiento de agua con base en datos suministrados por la Comisión Nacional de Energía, 1992.

En la tabla 3.9 anterior, no se incluye la ciudad de Manizales porque los SST tienen apoyo eléctrico; no se detectó ahorro eléctrico. Sin embargo, lo curioso es que los usuarios del sistema, 65% aproximadamente, perciben ahorro energético.

Con las cifras anteriores, se llegó a las siguientes conclusiones más importantes:

1. Se instalaron un total de 48.901 m<sup>2</sup> de SST en un lapso de cinco años por parte de empresas comercializadoras.
2. Existen dificultades en los costos iniciales puesto que son altos. La alternativa es realizar planes masivos de vivienda que los puedan absorber; sin embargo, se han logrado instalar algunos sistemas en urbanizaciones pequeñas.
3. La financiación para los sistemas de urbanización, por parte de las entidades bancarias, ha permitido el crecimiento de la capacidad de instalación de los SST, especialmente en las ciudades de Bogotá y Medellín.
4. Luego de un análisis y clasificación de las empresas comercializadores se llegó a concluir lo siguiente:

“El mercado es difícil y no estable: cerca del 90% de las empresas presentan una gran debilidad en el mercado lo cual refleja la fragilidad de esta actividad comercial



y su alta potencialidad de desaparición.” (Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, INEA, 1996).

5. La eficiencia mostrada por los sistemas sin apoyo eléctrico es del 30% aproximadamente. La temperatura de calentamiento de agua es de 30°C, lo cual se considera satisfactorio.
6. En los SST con apoyo eléctrico no aportan ahorro de energía porque presentan altos coeficientes de pérdidas térmicas, además se encuentran sin temporizador complementario.
7. Respecto a la satisfacción al usuario, las encuestas muestran lo siguiente:
  - a. Más del 70% de los usuarios califican los SST por encima de 7.
  - b. El 20% califica los SST por encima de 8.
  - c. Únicamente el 15% de los usuarios califican los SST por debajo de 6.
8. Se han presentado pérdidas térmicas por encima de  $4\text{W/m}^2$ , debido a mantenimiento y problemas de ruptura en aislamientos; sin embargo, las pérdidas se catalogan como aceptables comercialmente.
9. En cuanto a la eficiencia se estima en valores inferiores al 20 por ciento, causados por falta de mantenimiento y orientación de los colectores solares.
10. Una forma de mostrar la eficiencia de los SST es consumiendo el agua calentada de manera inmediata o en la noche, para reducir pérdidas térmicas, lo cual puede implicar un cambio en las costumbres de los usuarios.

### 3.4.3 Situación actual de energía eléctrica en Colombia

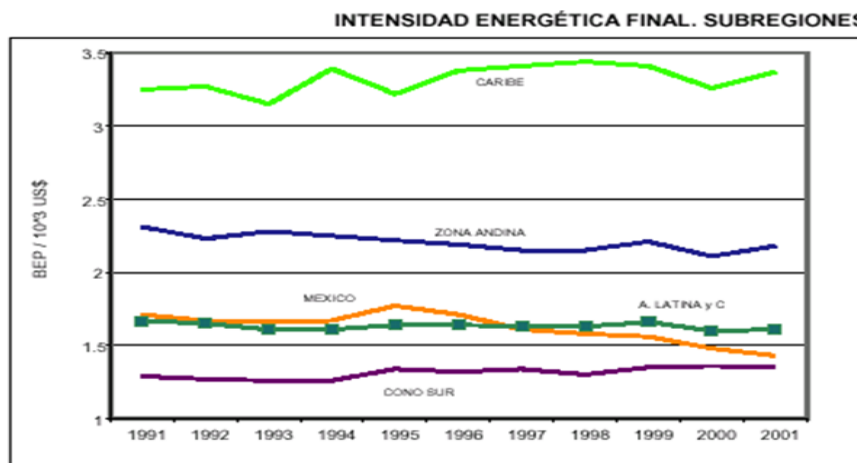
De acuerdo con el informe de la labor del Ministerio de Minas y Energía, se avanzó en la cobertura de servicio de energía eléctrica en el país, mediante la Ley 1376 del 8 de enero de 2010, donde se estipula el financiamiento del aumento de cobertura del servicio en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). (Ministerio de Minas y Energía, 2010).

Esta ampliación, permite el fortalecimiento de la red de interconexión eléctrica del país y el sistema de distribución de energía; empresas como Codensa, Enelar, Empresa de Energía de Cundinamarca, Empresa de Energía de Boyacá y Eletrificadora del Huila. Se beneficiarán también, municipios de Nariño y Cauca.

Se creó el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía, PROURE, donde se establecen los objetivos y programas para el ahorro de energía por sector.

En la siguiente figura se muestra el potencial energético por subregiones en Colombia. Ver Figura 3.8 Potencial energético por subregiones en Colombia.

**Figura 3.8 Potencial energético por subregiones en Colombia**



Fuente de imagen: [www2.isa.com.co](http://www2.isa.com.co)

Se estableció una modificación a la decisión CAN 720, con la decisión CAN 536 que se relaciona con las Transacciones Internacionales de Electricidad, TIE, de los países Andinos y, tiene que ver con los precios de demanda y condiciones de exportación nacional e internacional de energía.

Se adoptó el reglamento RETILAP en 2009 que se relaciona con los sistemas de alumbrado público e iluminación, que tienen como propósito garantizar los niveles de energía lumínica necesaria para la actividad visual, así como la calidad, seguridad, abastecimiento y preservación del medio ambiente. Adicionalmente, se crea el programa de Uso Racional y Eficiente de energía, URE, en iluminación.

El Sistema Interconectado Nacional de energía eléctrica del país se afecta de manera importante con los cambios climáticos, en especial, en el último año hubo una transición del fenómeno de la Niña (2008-2009) al del Niño (2009-2010), que han desembocado en precipitaciones que han afectado el territorio nacional en general.

En este sentido, la energía acumulada se incrementa y se eleva el promedio por encima de los niveles normales según la Curva de energía acumulada 2009-Abril 2010. En total el aporte de los ríos que suministran energía al SIN fue de 43.139,0 GWh, que equivalen al 88,8% de la media histórica (48.591,3 GWh).

Por otro lado, “los precios de oferta por tecnología se calculan con la mediana de precios de oferta de los combustibles principales, donde los recursos a gas incluyen los que mezclan gas-carbón y gas-líquidos. Y carbón, lo que utilizan carbón como único combustible.” (Martínez, Torres, Hernán, 2010).

Ahora por el lado académico, puede notarse el esfuerzo que comienza a realizar la academia, liderada por Universidades como la Nacional de Colombia, Los Andes, junto con el Ministerio de Minas y Energía, así como el Instituto de Asuntos Nucleares para mostrar la necesidad de tomar conciencia sobre el uso racional de la energía.

En el VI Simposio se afirma que:

“La crisis del Petróleo, tomó al país en la infortunada coyuntura de convertirse, por primera vez en su historia en un país importador de petróleo. En estas circunstancias, el país ha compartido la necesidad universal de replantear sus políticas energéticas y proceder a un cuidadoso estudio y planeamiento de su sector energético.” (Sociedad Colombiana de Energía Solar y Energías no Renovables, 1988).

Y continua señalando el documento que: “A pesar de los esfuerzos realizados, como el Estudio Nacional de Energía ENE en 1982 y la implementación del Sistema de Información Energética SIE en 1984 las políticas generales del gobierno han sido coyunturales.” (Sociedad Colombiana de Energía Solar y Energías no Renovables, 1988).

En el caso de Latinoamérica, la mayoría de los estudios sobre energía solar fotovoltaica que se han realizado, han tenido su centro de aplicación las zonas rurales del territorio; la razón fundamental, cubrir una necesidad de demanda de energía eléctrica con bajos costos de implementación y solución a corto plazo. Los sistemas fotovoltaicos pueden solucionar necesidades a comunidades muy aisladas, donde la red de electrificación nacional no ha llegado o es deficiente.

Este es un aspecto común para los países de América Latina donde, algunos estudios muestran que el recurso de la energía fotovoltaica puede ser eficiente aunque, inicialmente, el costo sea alto. Sin embargo, puesto que no existe una política “decidida” para convertir el uso de la energía solar en un recurso prioritario, en el cual deba invertirse capital y tecnología para su aprovechamiento, los esfuerzos por su uso están más supeditados a la iniciativa de la empresa privada. Es hasta hace muy poco tiempo que los Estados latinos se han interesado en el uso de las energías renovables. Los siguientes estudios son una muestra del beneficio que brinda el uso de la energía fotovoltaica y del gran impacto social que genera.

En Perú, por ejemplo, El Ministerio de Energía y Minas de ese país, realizó varios proyectos de electrificación rural con el fin de “mejorar la vida” (Ministerio de Energía y Minas. Dirección ejecutiva de proyectos, 2006), en las zonas rurales de la Amazonía peruana, usando fuentes de energías renovables para cubrir necesidades de energía eléctrica a comunidades que habitan la región.

### 3.5 Energía fotovoltaica en la ciudad de Bogotá

Son pocas las investigaciones que se han realizado en Bogotá (comparados con ciudades como Berlín, Madrid-España, París, Londres, etc., especialmente ciudades de países bajos, Centroamérica y África) sobre utilización de energía fotovoltaica. En la Universidad Nacional de Colombia existe un grupo de investigación llamado: Grupo de Materiales semiconductores & energía solar, liderado por el profesor Gerardo Gordillo, Físico de la misma universidad, con una amplia trayectoria en investigación sobre este campo, que viene realizando estudios sobre radiación solar y energía fotovoltaica en Bogotá y cuyos resultados son importantes para tener en cuenta. Algunos de sus trabajos más recientes son:

- *Monitoreo de una planta solar a partir de sistemas de adquisición desarrollados con instrumentación virtual*: donde se expone los resultados del desarrollo de un sistema que monitorea plantas de generación eléctrica con módulos fotovoltaicos, empleando Instrumentación Virtual. (Forero, Gordillo, Caicedo, & Hernández, 2006).
- *Desarrollo de materiales dispositivos y sistemas fotovoltaicos*: este es un proyecto de investigación que presentaron en noviembre de 2005 para continuar con los estudios que ha venido haciendo el grupo sobre materiales y dispositivos fotovoltaicos, desarrollo de nuevos dispositivos que no sean tóxicos de bajo costo y con aplicación en zonas rurales y urbanas.
- *Estudio de películas delgadas de semiconductores ternarios basados en  $cdte$  adicionado con  $S$  ó  $In$* : El objetivo de este estudio es preparación de películas

delgadas de las aleaciones  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$  y  $(\text{CdTe})_x(\text{In}_2\text{Te}_3)_{1-x}$  para  $0 < x < 1$  mediante la técnica de erosión catódica por Radiofrecuencia, determinar las propiedades ópticas y eléctricas de películas delgadas y la fabricación de celdas solares de heteroestructura  $\text{CdS}/\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$  y  $\text{CdTe}/(\text{CdTe})_x(\text{In}_2\text{Te}_3)_{1-x}$  empleando las técnicas de erosión por radiofrecuencia y serigrafía. (Gordillo, 2000).

En cuanto a estudios o investigaciones que los organismos locales del Estado colombiano hayan realizado, no se registran estudios de energía solar fotovoltaica para la ciudad de Bogotá específicamente, aunque existe a través de normas y leyes, la voluntad de obtener información y conocimiento sobre calidad de vida y medio ambiente en la ciudad, donde, por supuesto, el tema de las energías renovables y el uso, en especial, de la energía solar puede ser prioritario. Algunos ejemplos de normatividades que evalúan estos aspectos son:

- Plan de Desarrollo Económico, Social y de Obras Públicas, Bogotá, D. C., 2008 – 2012, “BOGOTÁ POSITIVA: PARA VIVIR MEJOR”. Documento para la deliberación Pública, de la Alcaldía Mayor de Bogotá. Este documento hace referencia a la propuesta hecha por el exalcalde Mayor Dr. SAMUEL MORENO ROJAS sobre la ciudad capital de Colombia del siglo XXI, donde en el Artículo 8 Programas, se hace una reflexión sobre el ambiente de la ciudad: “En Bogotá se vive un mejor ambiente. Garantizar el derecho a disfrutar de un ambiente sano a través de la implementación de acciones preventivas.” Particularmente se tiene la meta de “Mejorar la calidad del aire en la ciudad”, lo cual puede implicar planes para implementar energías limpias para la ciudad como la solar.
- Recientemente el Gobierno Nacional expidió la Ley 697 del 2001 que establece los lineamientos generales del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y demás Formas de Energía No Convencionales- PROURE, cuyo objetivo fundamental es: “Fomentar la utilización de fuentes energéticas convencionales y no convencionales con criterios de uso racional y eficiente, incluso a través de sistemas de cogeneración.” El Ministerio de Minas y Energía es el directo responsable de llevar a cabo los propósitos de esta Ley a través del Decreto 3652 del 17 de diciembre de 2003, que reglamenta la Ley 697.

- COLCIENCIAS proyecta presentar planes y proyectos para la investigación y desarrollo tecnológico de fuentes renovables en las Zonas No Interconectadas, como prioridad de acuerdo con lo establecido en la Ley 697. También desarrollará programas que sean pertinentes y, desplegará estrategias y acciones en conjunto con otras entidades, para crear líneas de investigación y desarrollo tecnológico en el uso racional y eficiente de la energía y/o fuentes no convencionales de energía.
- Por otro lado, el ICETEX hará préstamos a estudiantes de carreras o especializaciones relacionadas con el tema de uso racional y eficiente de la energía y/o fuentes no convencionales. Así mismo organizará un sistema de información que contenga la oferta de programas de postgrados nacionales e internacionales en relación con el uso eficiente y racional de la energía y/o fuentes no convencionales de energía.

Teniendo en cuenta las cifras anteriores y la necesidad de crear nuevas fuentes de energías limpias tanto en el mundo como en nuestro país, el presente estudio puede contribuir en la generación de una conciencia sobre el uso inteligente y sostenible de las fuentes energéticas para las actuales generaciones y las futuras; crear fuentes de información sobre energías renovables, en especial, la solar fotovoltaica con el fin de que la sociedad colombiana y, en especial, la bogotana pueda comprender a fondo lo que significan las energías renovables y su uso; apoyar los esfuerzos nacionales e internacionales en la recuperación de nuestro planeta para que el deterioro ambiental sea minimizado y no haya riesgo de una hecatombe mundial; lograr que la comunidad académica bogotana forme parte de las universidades internacionales que se encuentran realizando investigación en este campo.

## ***CAPÍTULO IV PRINCIPIOS DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA***

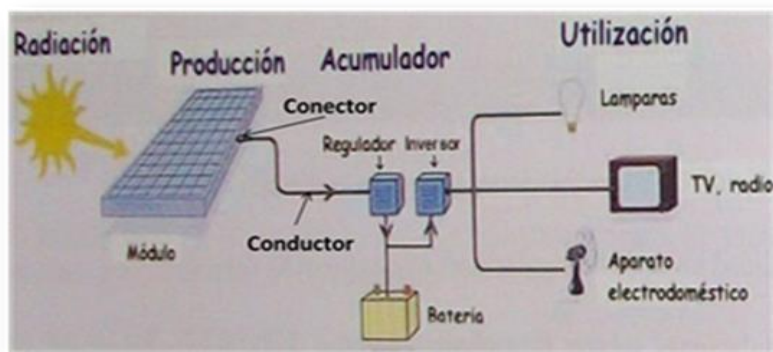
### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Se realiza un bosquejo general de lo que son los sistemas fotovoltaicos y sus principales características tecnológicas, mostrando, en particular, los sistemas instalados en el Club de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá, con los que se realizó esta investigación. También se explica el efecto fotovoltaico y un poco de la historia del surgimiento de este fenómeno. Se muestran las diferencias entre las tecnologías de paneles solares monocristalino y policristalino. Además se describe la tecnología de película delgada policristalina, cuyo avance es importante en la evolución de los sistemas fotovoltaicos.

### **4.2 LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Los sistemas fotovoltaicos están constituidos, en términos generales, por los componentes relacionados en la siguiente figura. Ver Figura 4.1 Componentes básicos de un sistema fotovoltaico.

**Figura 4.1 Componentes básicos de un sistema fotovoltaico**



-Sitio web de esta imagen electricidad-gratuita.com



1. La radiación solar que es la fuente de energía.
2. El módulo solar o panel que va a ser el generador de electricidad a partir de la transformación de energía solar que capta.
3. La batería o acumulador de energía, cuya función corresponde al almacenamiento de energía eléctrica generada por el panel, para ser usada posteriormente, por ejemplo, en la noche en iluminación o cuando sea necesario.
4. El regulador cuya función fundamental consiste en servir de protección a las baterías contra sobre descargas y sobre cargas eléctricas.
5. El inversor que transforma la corriente continua generada por el panel en corriente alterna para el uso en aparatos electrodomésticos.
6. Los conductores que son los cables que conectan cada uno de los componentes anteriores y están especialmente diseñados para instalaciones a la intemperie.
7. Los conectores para negativo y el positivo; generalmente vienen ya incorporados a los paneles, desde la fábrica y deben cumplir con especificaciones estándar según normas técnicas de instalaciones eléctricas para sistemas fotovoltaicos.

#### **4.2.1 Captadores de energía**

Hay gran variedad de sistemas de captación de energía fotovoltaica; depende, principalmente, de si el sistema va a estar conectado a una red o va a estar aislado. En general, se basan en la tecnología de los paneles solares, cuyas características se han descrito.

Los dos sistemas fotovoltaicos utilizados para este proyecto de investigación, uno monocristalino (Ver Figura 4.2 Panel monocristalino) y otro policristalino (Ver Figura 4.3 Panel policristalino), tienen las siguientes especificaciones.

**Figura 4.2 Panel monocristalino**

**PANEL MONOCRISTALINO**



Foto fuente: propia

Model (ECO 60W-M) Specifications	
ITEM NO.:	ECO 60W-M
Maximum Power (W)	60
Optimum Power Voltage (Vmp)	18.86
Optimum Operative Current (Imp)	3.18
Open Circuit Voltage (Voc)	22.35
Short Circuit Current (Isc)	3.4
Solar Cell:	125*82 Mono
Number of Cell (pcs)	4*9
Brand Name of Solar Cells	Jetion Cell
Size of Module(mm)	800*546*35
Front Glass Thickness (mm)	3.2
Temperature Range	-40°C to +85°C
Module Efficiency (%)	13.73%
Warranty	90% of 10 years, 80% of 25 years.
Standard Test Conditions	AM1.5 1000W/m <sup>2</sup> 25 +/-2°C

**Figura 4.3 Panel policristalino**

**PANEL POLICRISTALINO**



Foto fuente: propia

Ningbo Qixin Solar Electrical Appliance Co.,Ltd	
Model(SL60CE-18P)Specifications	
SL60CE-18P	ITEM NO.:
Maximum Power(W)	60
Optimum Power Voltage(Vmp)	17,49
Optimum Operatige Current(Imp)	3,43
Open Circuit Voltage(Voc)	21,67
Short Circuit Current(Isc)	3,67
Solar Cell:	156*70 Poly
Number of Cell(pcs)	4*9
Brand Name of Solar Cells	Jetion Cell
Size of Module(mm)	710*668*35
Front Glass Thikness(mm)	3,2
Temperature Range	-40°C to +85°C
Module Efficiency (%)	12,65%
90% of 10 years,80% of 25 years.	Warranty
Standard Test Conditions	AM1.5 1000W/m <sup>2</sup> 25 +/-2°C

De acuerdo con las especificaciones, los dos modelos pueden alcanzar 60 W de potencia. Existen diferencias en el voltaje pico, para el monocristalino un máximo de 18.86 Vmp y para el policristalino, 17.49 Vmp; en corriente máxima pico (Imp), en corriente a circuito abierto y en corriente a circuito cerrado.

Algunos estándares internacionales sobre paneles a tener en cuenta son los siguientes:

***Características:***

- |                            |   |
|----------------------------|---|
| • Irradiancia:             | 100mW/cm <sup>2</sup> o 1000 W/m <sup>2</sup> . |
| • Distribución espectral:  | AM 1,5.   |
| • Temperatura de la celda: | 25°C.   |

<p><i>AM (Air Mass) 1,5 G. Espesor de la atmósfera atravesado por una masa de aire con una determinada inclinación (aproximadamente de 48°). Por lo tanto, <math>AM = 1/\cos 48^\circ = 1,5</math> G.</i></p>
---

\* Los anteriores datos son tomados de (Martín Jiménez, 2008)

Además de éstas cifras, se establece a partir de algunas mediciones, los valores para determinar la eficiencia en general de los paneles solares.

***Rendimiento del panel:***

El rendimiento de un panel solar se establece con la relación entre la potencia útil (Pu), es decir, la máxima potencia que puede aportar el panel teóricamente y, la potencia absorbida (Pa) que es la que recibe realmente. Esto se resume en la siguiente fórmula:

$$\eta = 100 \left( \frac{Pu}{Pa} \right). \quad (1)$$

El rendimiento del panel monocristalino es de:13.73% y el del policristalino es de: 12.65%.

Estos son datos de los sistemas fotovoltaicos del proyecto.

### ***Tensión en circuito abierto:***

Es la máxima tensión que puede ofrecer un panel solar; puede variar entre 21 V y 42 V en paneles de 12 V o 24 V respectivamente. Para obtener el dato se conecta un voltímetro en los bornes del panel teniendo en cuenta las polaridades para evitar errores fatales.

### ***Corriente en cortocircuito:***

Se obtiene cuando entre los bornes del panel, la tensión es cero, en ese momento se puede obtener la máxima corriente que puede dar el panel. La intensidad depende del modelo de panel pero se encuentra entre 2 A y 3,45 A. Para tomar la medida se utiliza un multímetro con una escala de 10 A en corriente continua.

### ***Tensión, potencia e intensidad en la carga:***

La carga puede tomarse con un bombillo de 24 V o 12 V; es necesario tener en cuenta que la carga no puede ser mayor a la potencia del panel. Para tomar la medida tomamos dos multímetros, uno en una escala de 50 V en corriente continua y el otro en una escala de 10 A, también de corriente continua y se conectan. Cuando obtengamos las dos medidas anteriores podemos obtener el dato de potencia aplicando la llamada Ley de Ohm, que nos indica que la potencia es el producto del voltaje o tensión por la corriente  $P = V \times I$  y las unidades son en voltios.

### ***Formas de conexión entre paneles:***

Existen básicamente dos formas de conectar paneles solares: conexión en serie y conexión en paralelo. En la primera, es decir, en serie, la tensión total de un sistema de paneles será la suma de cada una de las tensiones dadas por cada panel conectado así:

$$V_t = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (2)$$

De acuerdo con la cantidad de paneles del sistema, se sumará las tensiones para obtener la tensión total. De igual manera, la potencia total del sistema será:

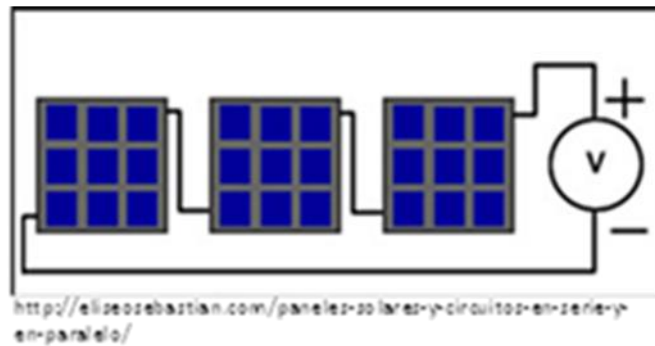
$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad (3)$$

Ahora, la intensidad de corriente tendrá el mismo valor para cada una de las intensidades dadas por cada panel y en el total también, es decir:

$$I_t = I_1 = I_2 = I_3 = \dots I_n \quad (4)$$

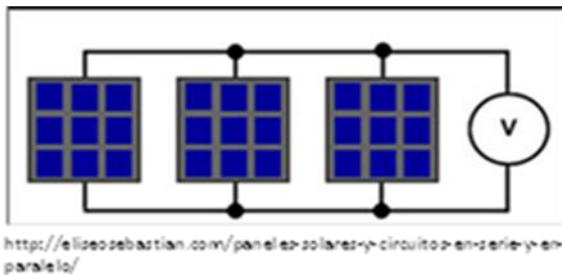
En la figura 4.4 se representa un sistema de paneles conectados en serie. Ver Figura 4.4 Paneles conectados en serie.

**Figura 4.4 Paneles conectados en serie**



En la conexión de paneles en paralelo, tenemos una situación diferente; al contrario de la conexión en serie, aquí el voltaje o tensión se reparte por igual para cada panel, por lo tanto, la tensión total será igual en cada uno de los paneles:

**Figura 4.5 Paneles conectados en paralelo**



$$V_t = V_1 = V_2 = V_3 = \dots V_n \quad (5)$$

En la figura 4.5 se representa un sistema de paneles conectados en paralelo. Ver Figura 4.5 Paneles conectados en paralelo.

#### 4.2.2 Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica

Un sistema fotovoltaico puede proporcionar energía para que sea guardada o almacenada en acumuladores llamados baterías. Estas baterías son parecidas a las de los carros porque

cumplen con el propósito de almacenar energía eléctrica, pero se diferencian en la forma como la acumulan. Se les llama de “ciclo profundo”, cuya característica es que pueden ser descargadas durante un buen número de horas, lentamente, sin que sufran daño, aunque no sean recargadas en varios días. Generalmente, son de plomo-ácido o níquel-cadmio.

Como cualquier batería, su funcionamiento se basa en los procesos electroquímicos generados por los polos negativo y positivo y, el electrolito.

Existen dos tipos de baterías: de carga superficial y de carga profunda.

Las baterías de descarga superficial pueden tener una descarga, aproximada del 40% de su capacidad diaria; también pueden tener una descarga por lo menos dos veces al año, hasta del 60%, aproximadamente, sin que sus materiales sufran algún daño. Son utilizadas por los sistemas fotovoltaicos pequeños. En la foto de la figura 4.6 se muestran las baterías usadas por los sistemas fotovoltaicos usados en este estudio. Ver Figura 4.6 Baterías para sistemas fotovoltaicos.

**Figura 4.6 Baterías para sistemas fotovoltaicos**



Por otro lado, las baterías de carga profunda, suelen tener una descarga del 60% diaria y anual del 80%. Es aconsejable que la corriente de carga de una batería no rebase el 10% de su capacidad útil (generalmente, la corriente de carga está entre el 6% al 6.5%).

Para cargar y descargar una batería podemos adoptar el siguiente procedimiento:

- Se mide la tensión y la corriente con la batería descargada, a una hora determinada.
- Se coloca a cargar la batería y comienza a medirse la tensión y la corriente simultáneamente, tomando el tiempo de carga.
- Se pueden ir midiendo las anteriores variables, cada minuto, por ejemplo, para ver el progreso de carga de la batería.

- Se pueden obtener datos, los que se crean convenientes para mostrar tiempo de carga de la batería, corriente máxima, teniendo en cuenta condiciones climáticas.

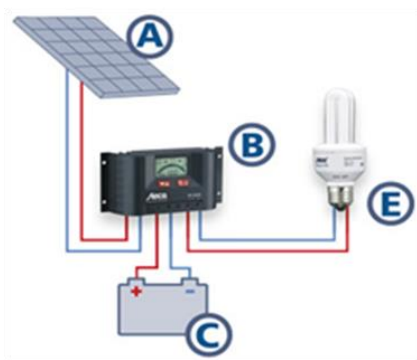
Algo importante a tener en cuenta son las condiciones del lugar donde se encuentran las baterías, el aire del lugar debe renovarse, por lo tanto, es necesario que el sitio tenga una buena ventilación para evitar acumulación de gases que pueden contaminar el ambiente circundante.

### 4.2.3 El regulador

Como la energía generada por el sistema fotovoltaico es irregular debido, especialmente a los cambios climáticos, es necesario regular el funcionamiento entre los paneles solares y las baterías para controlar la carga que les llega. Generalmente, cuando se va a implementar grandes sistemas fotovoltaicos, se calcula el número de paneles en época invernal porque es el tiempo de menor incidencia de la radiación sobre el planeta, contrario a lo que sucede en verano.

Los reguladores son aparatos que nos ayudan a controlar la carga que llega a las baterías; evita los excesos o sobrecargas, las descargas profundas y mantiene constante la tensión, se conectan entre los generadores o paneles y los sistemas de acumulación o baterías. La figura 4.7 ilustra lo anterior. Ver Figura 4.7 Función del regulador.

**Figura 4.7 Función del regulador**



Sitio web de esta imagen  
proyecto-pragmatica.blogspot.com

En la imagen se muestra el panel (A) conectado al regulador (B) y este conectado a la batería (C) a donde llegará la carga dada por el panel, pero controlada por el regulador y (E) un bombillo ahorrador al cual le suministrará una tensión de 110 V o 210 V.

En el mercado se pueden encontrar gran variedad de reguladores, todos con especificaciones técnicas,

elaborados de acuerdo con la necesidad de los aparatos eléctricos que se quiere controlar y, también para instalaciones eléctricas especiales como los sistemas fotovoltaicos.

### ***Funcionamiento de un regulador***

Los reguladores funcionan con base en micro-controladores programados especialmente para detectar situaciones límite de carga de las baterías. Cuentan con una programación avanzada que les permite adaptarse a diversas situaciones de forma automática y, también admiten el control manual de sus características funcionales. Los parámetros con los que trabajan son valores de temperatura, intensidad de carga, descarga y capacidad de la batería.

El regulador funciona, básicamente con tres formas de manejo de la carga. Ver Figura 4.8 Manejo de carga de un regulador.

**Figura 4.8 Manejo de carga de un regulador**

En la **igualación** “... el regulador permite la realización automática de cargas de igualación de los acumuladores tras un periodo de tiempo en el que el estado de carga ha sido bajo, reduciendo al máximo el gaseo en caso contrario”. (Fernández S. J., 2008).



**Fuente: propia**

Luego, el regulador da paso a la corriente a la batería de tal manera que, éstas puedan alcanzar el punto de **carga profunda**. Cuando esta se completa, el sistema del regulador cesa el paso de carga (alcanza un 90% de carga, aproximadamente) y pasa a la etapa final.

En la última fase llamada “Banda de Flotación Dinámica” (BFD). “La BFD es un rango de tensión cuyos valores máximo y mínimo se fijan entre la tensión final de carga y la tensión nominal + 10% aproximadamente”. (Fernández S. J., 2008).



**Figura 4.9 Regulador**



En el caso de los sistemas solares fotovoltaicos instalados, tenemos dos tipos de reguladores, uno para cada panel. Ver Figura 4.9 Regulador.

En general, los reguladores ofrecen tres servicios fundamentales para el control de carga:

Protección contra **sobrecarga** que, constituye la principal función del regulador porque protege la batería evitando que se caliente demasiado y que ocurra la oxidación de las placas electrolíticas. “Cuando la insolación aumenta, el voltaje de los paneles supera al del banco de baterías el proceso de carga se reanuda. Es entonces cuando el control de carga tiene un rol activo, evitando una gasificación excesiva del electrolito”. (Fernández S. J., 2008).

Muestra cuando una batería está siendo descargada a través de una **alarma** que puede ser luminosa o sonora, indicando que es importante bajar el consumo eléctrico para evitar un daño en la batería. Esto puede suceder en días nublados, en la noche, cuando el nivel de insolación es bajo y los paneles no pueden cargar las baterías. “En este último caso el control de carga cumple un rol pasivo, aislando el banco de acumulación del bloque de generación, evitando su descarga.” (Fernández S. J., 2008)

Cuando la batería llega a un nivel peligroso (muy bajo) de carga, el regulador realiza una **desconexión** automática de suministro de corriente para proteger a la batería de una descarga profunda, lo cual podría ocasionar un daño irreparable. Ver Figura 4.10 Desconexión de la batería.

**Figura 4.10 Desconexión de la batería**



**Fuente: propia**

#### 4.2.4 El inversor

Cumple la función esencial de convertir la energía eléctrica directa o corriente continua que llega de los paneles en energía eléctrica alterna o corriente alterna. Controla la amplitud de la corriente según la potencia que le suministra el panel, intentando obtener la mayor potencia posible del panel fotovoltaico.

El inversor usado en este estudio se puede ver en la figura 4.11 El inversor. Ver Figura 4.11 El inversor.

Figura 4.11 El inversor



#### 4.2.5 Conductores y conectores

Los cables y conectores son los dispositivos que unen los componentes fotovoltaicos como los paneles, el regulador, la batería y el inversor, para convertir todo el conjunto en un sistema que opere como una fuente de energía eléctrica. Deben cumplir con estándares de calidad eléctrica para su funcionamiento óptimo. La figura que a continuación se muestra, registra la forma de conexión de cada uno de los sistemas fotovoltaicos, monocristalino y policristalino, que se utilizaron en este trabajo.

Ver Figura 4.12 Secuencia de conexiones de los sistemas fotovoltaicos.

Figura 4.12 Secuencia de conexiones de los sistemas fotovoltaicos



Conexiones que vienen  
De los paneles a la caja  
de conexiones exterior



Caja de conexiones exteriores  
desde los paneles



Conexiones desde la caja exterior  
hacia un lugar interior de control



Conexiones que llegan del exterior a una  
caja interior para controlar la carga directa



Conexiones desde la caja  
interior hasta los reguladores



Conexiones de los reguladores  
a las baterías, interior

## 4.3 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

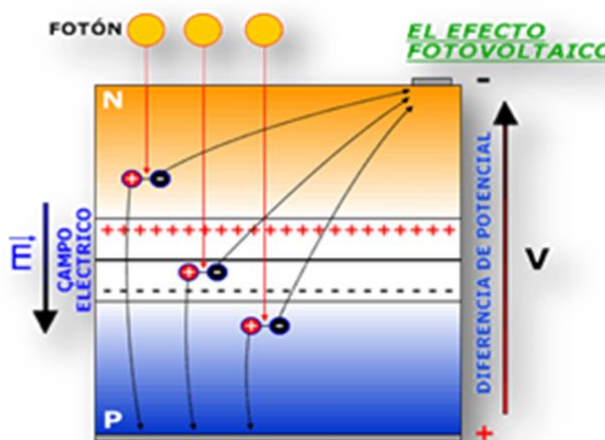
### 4.3.1 Los fotones producen electricidad. El efecto fotovoltaico

El fundamento de la tecnología solar fotovoltaica se encuentra en el llamado efecto fotoeléctrico o fotovoltaico que puede definirse como: “... la aparición de una corriente eléctrica en ciertos materiales cuando estos se ven iluminados por radiación electromagnética, sin que sea necesario que aparezca o intervenga ningún efecto, mecánico o físico.” (Fernández S. J., 2008). Se ilustra en la siguiente figura. Ver Figura 4.13 Efecto fotovoltaico.

Cuando la energía solar en forma de fotones, incide sobre los electrones (electrones de valencia) de un material semiconductor, éstos adquieren la energía suficiente para saltar de un nivel de enlace atómico estable a uno que permite generar un movimiento y se genera una diferencia de potencial continua.

Cada electrón que se mueve deja un hueco (+) en el lugar donde se encontraba antes de la llegada del fotón. Así, el electrón (-) se mueve en un sentido y el hueco en el sentido contrario, esto es, finalmente, una corriente eléctrica.

Figura 4.13 Efecto fotovoltaico



Fuente: <http://www.ujaen>

Esta corriente puede ser conducida a través de un circuito externo que se conecta al semiconductor, con el fin de aprovecharla en diferentes aplicaciones. Para lograr un campo eléctrico suficiente para la generación de la corriente eléctrica se utiliza una unión de dos semiconductores: uno de tipo P (con exceso de huecos) y otro de tipo N (con exceso de electrones).

#### 4.3.2 En el pasado del efecto fotoeléctrico

Son muchos los investigadores con sus experimentos, que permitieron deducir el efecto fotovoltaico; cuando se examina con cierto detenimiento la historia de la ciencia, se puede constatar que la empresa humana sigue siendo una conquista continua por entender. Mentes brillantes y curiosas como las de Becquerel, Hertz, Einstein y muchos otros contribuyeron de manera significativa al confort tecnológico del cual disfrutamos hoy, aunque para ellos significó, en muchas ocasiones, grandes sacrificios y soledades. Ver Figura 4.14 Descubridores del efecto fotoeléctrico.

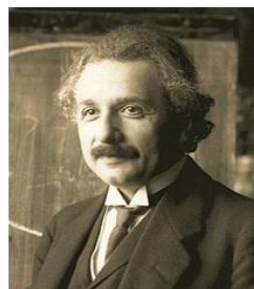
**Figura 4.14 Descubridores del efecto fotoeléctrico**



**Edmund Becquerel descubrió el efecto fotoeléctrico en 1839**



**Heinrich Hertz descubre el efecto fotoeléctrico con luz ultravioleta en 1887**



**Albert Einstein explica el efecto fotoeléctrico en 1905 y gana el premio nobel en 1921**

Fuente figura: wikipedia.org

Es por esta razón y también, por el hecho de que la ciencia y la tecnología son productos de esa labor constante y tortuosa, que vale la pena resaltarlos.

Se menciona que Edmund Becquerel descubrió el efecto fotoeléctrico en 1839, cuando observó que se producía un voltaje al iluminar dos electrodos metálicos (de platino) que se encontraban sumergidos en una solución ácida.

Willoughby Smith (1873), encuentra que en sólidos como el selenio también se puede producir el efecto fotoeléctrico:

“...mientras analizaba materiales para su aplicación en cables de telégrafo marinos, observó la sensibilidad del selenio bajo la acción de radiación solar. La observación de Smith del efecto fotovoltaico en un sólido condujo a experimentar y especular sobre las aplicaciones del selenio en células solares.” (Cánovas Díaz, 2009)

Pero fueron W.G Adams y R.E. Day quienes, en 1877, “construyeron la primera celda de selenio” (Fernández S. J., 2008).

Charles Fritts en 1884 fabricó también una celda solar que estaba formada por selenio recubierto de una fina capa de oro. Sin embargo, sólo fue hasta que Heinrich Hertz, hacia 1887, casi accidentalmente, al descubrir el mismo efecto en sus experimentos sobre ondas electromagnéticas, fabricó las primeras celdas fotovoltaicas que convertían luz en corriente eléctrica en un porcentaje de hasta el 2% de eficiencia.

El efecto fotoeléctrico, así como los experimentos de Hertz y la teoría electromagnética de Maxwell inspiraron a muchos científicos a continuar por el camino de la luz. Uno de ellos, J. J. Thomson, “pensaba que el campo electromagnético de frecuencia variable producía resonancias con el campo eléctrico atómico y que si estas alcanzaban una amplitud suficiente podía producirse la emisión de un “corpúsculo” subatómico de carga eléctrica y por lo tanto el paso de la corriente eléctrica.” (Fernández S. J., 2008).

### 4.3.3 Diferencias entre mono y poli

En la actualidad se cuenta con diversos tipos de celdas solares que cumplen con la misma función, pero con diferencias importantes en su fabricación. A continuación se muestran las características de las monocristalinas y de las policristalinas. Ver Figura 4.15 Celdas cristalinas.

Figura 4.15 Celdas cristalinas



Fuente: (Celdas solares, 2010)

Características de los monocristalinos:

*“Estructura cristalina – Todas las caras del cristal tienen la misma dirección, los granos de cristal son paralelos  
 Como se fabrican – Cortan una columna de silicio mono-cristalino para obtener rodajas circulares y luego hacer cuadrados  
 Temperatura de fabricación – 1400 ° C  
 Forma – Forma simple rectangular, las cuatro esquinas se pierden  
 Ancho – 300?m  
 Color – Negro  
 Eficiencia de conversión Energética = 15% ~ 23%  
 Costo – Alto costo  
 Tiempo de Amortización – 2 años” (hormigasolar.com, 2010)*

### Características de los policristalinos:

*“Estructura cristalina – caras de cristal tienen diferentes direcciones, los granos de cristal no son paralelas  
Como se fabricación – Cortan el cuadrado de silicio mono-cristalino para obtener rebanadas cuadradas directamente, se puede utilizar para obtener el silicio mono-cristalino  
Temperatura de fabricación – 800 – 1000 ° C  
Forma – Rectángulo o formas cuadradas, diversas  
Ancho – 300 ~ 500?m  
Color – Azul oscuro  
Eficiencia de conversión Energética – 12% ~ 17%  
Costo – Alto costo, pero menor que las Mono-cristalinas  
Tiempo de Amortización – 2 a 3 años” (hormigasolar.com, 2010)*

Los paneles fotovoltaicos están compuestos por células fotovoltaicas de silicio monocristalino o policristalino. La diferencia entre una y otra radica en el procedimiento de fabricación. Las células de silicio monocristalino se obtienen a partir de silicio muy puro, que se refunde en un crisol junto con una pequeña proporción de boro. Una vez que el material se encuentra en estado líquido se le introduce una varilla con un 'cristal germen' de silicio, que se va haciendo recrecer con nuevos átomos procedentes del líquido, que quedan ordenados siguiendo la estructura del cristal. (Fernández Barrera, 2010).

De esta forma se obtiene una monocristal dopado, que luego se corta en obleas de aproximadamente 3 décimas de milímetro de grosor. Estas obleas se introducen después en hornos especiales, dentro de los cuales se difunden átomos de fósforo que se depositan sobre una cara y alcanzan una cierta profundidad en su superficie. Posteriormente, y antes de realizar la serigrafía para las interconexiones superficiales, se recubren con un tratamiento anti reflexivo de bióxido de titanio o zirconio.

En las células policristalinas, en lugar de partir de un monocristal, se deja solidificar lentamente sobre un molde la pasta de silicio, con lo cual se obtiene un sólido formado por muchos pequeños cristales de silicio, que pueden cortarse luego en finas obleas policristalinas.(GIL GARCIA, 2008).

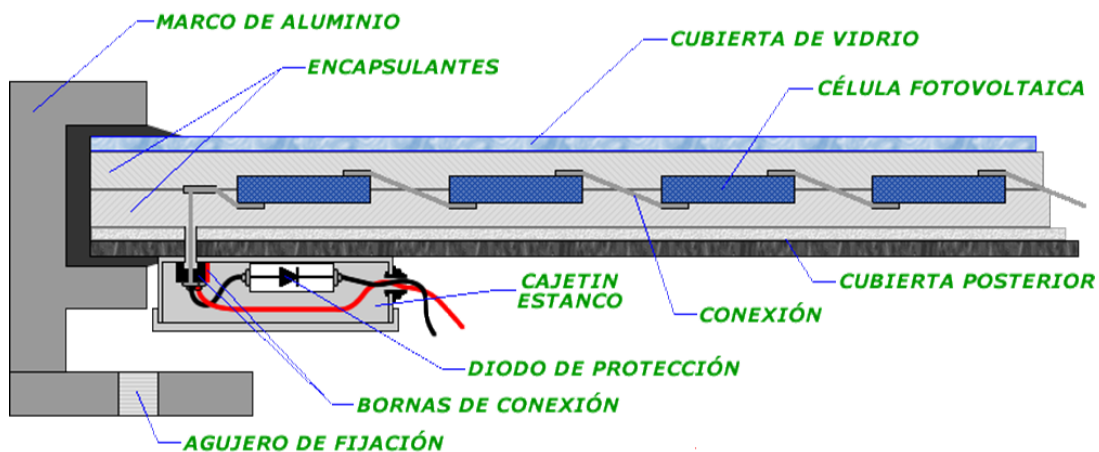


#### 4.3.4 Configuración de un panel fotovoltaico

##### *Corte transversal de un panel fotovoltaico*

Este conjunto de células está envuelto por unos elementos que le confieren protección frente a los agentes externos y rigidez para acoplarse a las estructuras que los soportan. Los elementos son los siguientes. Ver Figura 4.16 Elementos que componen un panel fotovoltaico.

Figura 4.16 Elementos que componen un panel fotovoltaico



Fuente: ujaen.es

- **Encapsulante:** constituido por un material que debe presentar una buena transmisión a la radiación y una degradabilidad baja a la acción de los rayos solares.
- **Cubierta exterior de vidrio templado:** que, aparte de facilitar al máximo la transmisión luminosa, debe resistir las condiciones climatológicas más adversas y soportar cambios bruscos de temperatura.

- *Cubierta posterior*: constituida normalmente por varias capas opacas que reflejan la luz que ha pasado entre los intersticios de las células, haciendo que vuelvan a incidir otra vez sobre éstas.
- *Marco de metal*: normalmente de aluminio, que asegura rigidez y estanqueidad al conjunto, y que lleva los elementos necesarios para el montaje del panel sobre la estructura soporte.
- *Caja de terminales o bornes de conexión*: incorpora los bornes para la conexión del módulo.
- *Diodo de protección*: impiden daños por sombras parciales en la superficie del panel. (Fernández Barrera , Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica, 2010).

## CAPÍTULO V DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 ALGUNOS DATOS APORTADOS POR LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: MUESTREO Y ANÁLISIS

A continuación se muestran y analizan algunos de los datos más significativos obtenidos en la investigación. Debido a la gran cantidad de datos, se seleccionaron los que representan cambios importantes para el análisis aquí propuesto.

### 5.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DE REFERENCIA

Algunos de los datos más importantes a tener en cuenta para comprender el clima de la ciudad de Bogotá, son los que a continuación se incluyen. Se tomaron de la página oficial del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

De acuerdo con el Atlas Climatológico Nacional, del Programa Nacional de Radiación, tomamos los valores sobre radiación solar que se resumen en la siguiente tabla, donde podemos encontrar los valores máximos posibles de radiación por hora día-sol. Ver Tabla 5.1 Valores de radiación promedio en Colombia.

**Tabla 5.1 Valores de radiación promedio en Colombia**

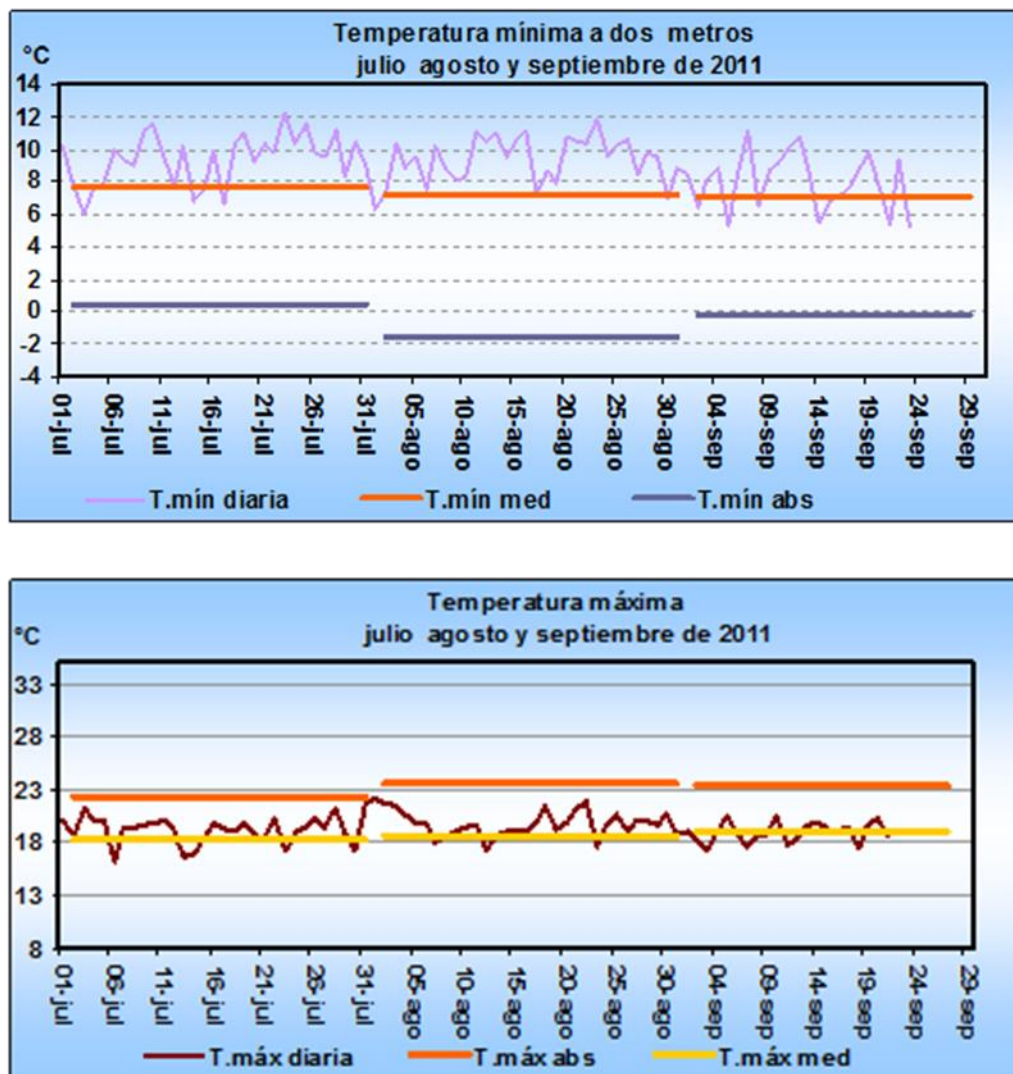
	HORA	VALOR MÁXIMO
1	6 y 7 am	100 w/m <sup>2</sup>
2	7 y 8 am	200 w/m <sup>2</sup>
3	8 y 9 am	600 w/m <sup>2</sup>
4	9 y 10 am	750 w/m <sup>2</sup>
5	10 am y 2 pm	1000 w/m <sup>2</sup>
6	2 y 3 pm	750 w/m <sup>2</sup>
7	3 y 4 pm	500 w/m <sup>2</sup>
8	4 y 5 pm	300 w/m <sup>2</sup>
9	5 y 6 pm	100 w/m <sup>2</sup>

La tabla 5.1 muestra que los valores de radiación máxima se encuentran entre las 10 am y las 2 pm, como es de esperarse debido a que son las horas del día donde el Sol se encuentra más perpendicularmente sobre la superficie del país. En las horas de 6 a 7 am y 5 a 6 pm la

radiación baja considerablemente a  $100 \text{ W/m}^2$ , puesto que el Sol se encuentra en posiciones con ángulos muy agudos con respecto al territorio nacional, tanto en la mañana, como en la tarde. Los rayos solares no llegan perpendicularmente, sino con grados de inclinación con respecto a la vertical que oscilan entre  $30^\circ$  y menos.

**Datos meteorológicos de temperatura.** Ver Figura 5.1 Temperatura máxima y mínima en Bogotá. Tomados de la estación meteorológica de El Dorado.

**Figura 5.1 Temperatura máxima y mínima en Bogotá**



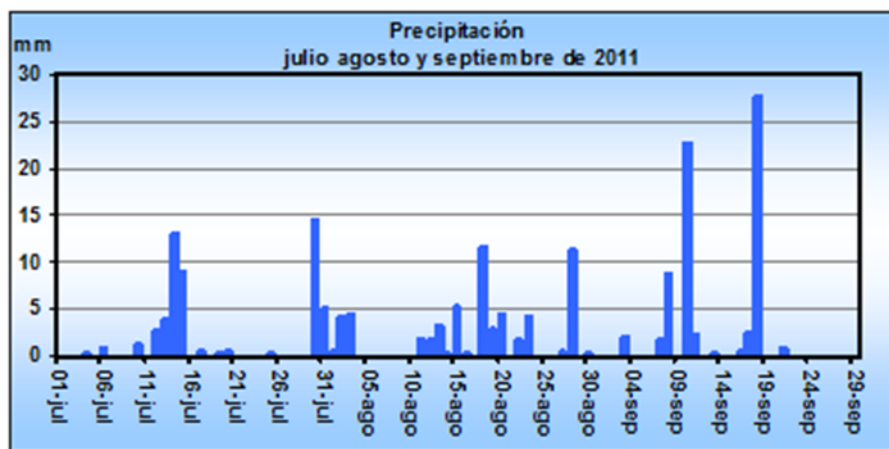
Fuente: IDEAM

Como puede observarse en los datos suministrados por el IDEAM, el promedio de la temperatura diurna en Bogotá se encuentra entre: 6°C a 8°C temperatura mínima media diaria. Entre 2°C y -2°C la temperatura mínima absoluta diaria y, entre 6°C y 12°C la temperatura mínima diaria.

Para la temperatura máxima en Bogotá, tenemos los siguientes datos relevantes: la temperatura máxima diarias oscila entre 17°C y los 22°C. La temperatura máxima absoluta diaria se encuentra entre los 22°C y los 24°C, y para la temperatura máxima media diaria, tenemos una oscilación entre 18°C y 20°C aproximadamente.

***Datos meteorológicos de precipitaciones en Bogotá.*** Ver Figura 5.2 Precipitaciones en Bogotá.

**Figura 5.2 Precipitaciones en Bogotá**

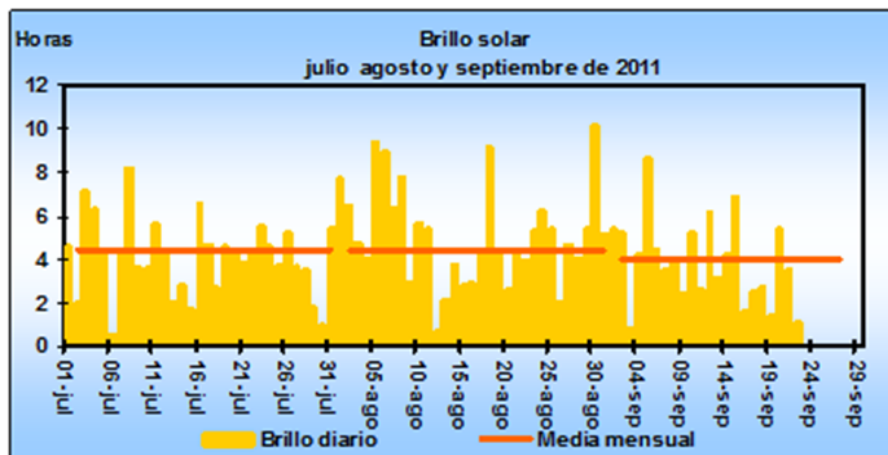


Fuente: IDEAM

De acuerdo con los anteriores datos, Bogotá es una ciudad de lluvias durante la mayor parte del tiempo medido. Las mayores precipitaciones se presentan entre 10 al 19 de septiembre y las menores se presentan en intervalos de días como: 1 al 5 de julio, 7 a 10 de julio, 22 a 24 de julio, 27 a 30 de julio, 4 a 11 de agosto, 24 a 27 de agosto, 2 a 3 de septiembre, 10 de septiembre, 11 de septiembre 15 a 16 de septiembre, 20 a 21 de septiembre y, finalmente un lapso largo entre 23 al 30 de septiembre.

*Datos meteorológicos de brillo solar en Bogotá.* Ver Figura 5.3 Brillo solar en Bogotá.

**Figura 5.3 Brillo solar en Bogotá**



Fuente: IDEAM

Respecto al brillo solar registrado en Bogotá, puede observarse de la figura 5.3 anterior, que la mayor parte del tiempo, la ciudad registra buenos niveles de brillo solar durante el tiempo medido. La media mensual se encuentra entre 4 y 5 horas de brillo diario. Es interesante observar que mientras las mayores precipitaciones se presentaron entre el 10 y 19 de septiembre, según figura 5.2 de precipitaciones, el brillo solar estuvo por debajo de su promedio en ese lapso, 2,4 a 3 horas de brillo diarias, aproximadamente. El día de mayor brillo solar es el 1 de agosto (10 horas), donde no se registran precipitaciones.

### 5.3 LAS INTERFACES PARA LA TOMA DE DATOS

Los datos y gráficos que se muestran y analizan, corresponden a medidas realizadas con las interfaces electrónica y gráfica de las siguientes características:

### ***La interfaz electrónica:***

Consiste de un sistema electrónico de adquisición de datos automático compuesto por ocho canales de entrada, cuya función fundamental es el monitoreo y reporte de las condiciones climáticas y los parámetros de voltaje en circuito abierto, voltaje en los paneles con una carga determinada, corriente y potencia consumida de acuerdo con la carga conectada.

Estos sistemas conocidos como Data Logger son dispositivos electrónicos que leen y almacenan las mediciones en orden cronológico junto con la fecha y hora de cada medición. (Saravia, 2004).

Se realizaron algunas modificaciones para la adquisición de datos con una señalización DTMF y, se le acondicionó un puerto serial para establecer comunicación con un computador personal, a donde llegan los datos obtenidos de los paneles en forma de registros que transmite directamente la interfaz, ya que ésta no posee capacidad de almacenamiento.

En un programa de visualización se puede observar en pantalla del pc los registros. Se ordenan por horario y se guardan en un archivo y una base de datos.

Los componentes principales del Data Logger son:

- Un microprocesador con circuitería periférica.
- Una memoria EProm que es parte del programa.
- Una memoria RAM para almacenar temporalmente los datos.
- Un Conversor Análogo Digital (CAD) de ocho canales de entrada.
- Un circuito para el acondicionamiento de las entradas obtenidas.
- Un circuito que se despliega para mostrar en secuencia los valores obtenidos al instante por cada entrada de información.

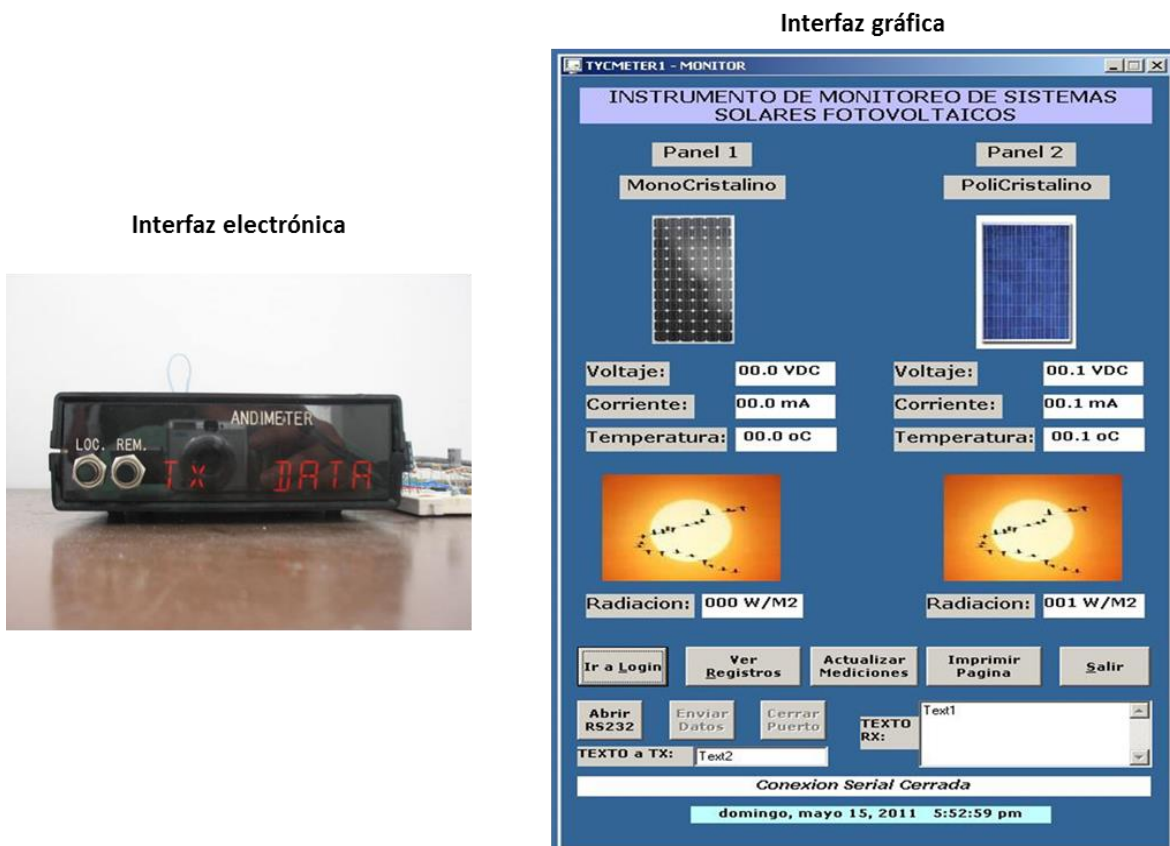
### ***La interfaz gráfica:***

Se utilizó el lenguaje de programación Visual Basic 6, puesto que existen compatibilidad entre la interfaz electrónica y el computador personal.

El empaquetamiento del programa se logra con una plataforma VB6, en un archivo ejecutable con los archivos necesarios para su ejecución efectiva. Se escogió esta interfaz por su fácil manejo, ya que con un solo clic sobre el ícono “TYCMETER.EXE”, se inicia de inmediato el programa.

A continuación se muestran fotos de las interfaces electrónica (ANDIMETER) y gráfica (TYCMETER). Ver Figura 5.4 Interfaces.

**Figura 5.4 Interfaces**



**Fuente: propia**



## 5.4 MUESTRA DE DATOS OBTENIDOS

Para la adquisición de la información de los paneles fotovoltaicos se siguió el proceso descrito en el primer capítulo, numeral 1.6.3 Técnicas de recolección de datos. *Grosso modo*, el proceso es:

- Sistema fotovoltaico: corriente, potencia, voltaje, parámetros generados por el sistema.
- Conversión de variables: datos en formato de número. (interface electrónica).
- Visualización de datos: Conversor análogo digital → PC → Interface gráfica.

## 5.5 DATOS OBTENIDOS CON CIRCUITO ABIERTO

Inicialmente se tomaron datos de voltaje de salida de los dos paneles, sin carga con intervalos de 43 segundos, entre el 12 y el 17 de mayo de 2011. Ver Tabla 5.1 Voltajes en circuito abierto (muestra).

**Tabla 5.1 Voltajes en circuito abierto (muestra)**

Item	Fecha	Hora	Voltaje Panel Mono Volts	Voltaje Panel Poly Volts	Resistencias
823	12/05/2011	12:26:50	20,20	20,70	Cicuito Abierto
824	12/05/2011	12:27:32	20,20	20,70	Cicuito Abierto
825	12/05/2011	12:28:15	20,30	20,80	Cicuito Abierto
826	12/05/2011	12:28:58	20,30	20,80	Cicuito Abierto
827	12/05/2011	12:29:40	20,40	20,70	Cicuito Abierto
828	12/05/2011	12:30:23	20,40	20,70	Cicuito Abierto
829	12/05/2011	12:31:06	20,30	20,80	Cicuito Abierto
830	12/05/2011	12:31:49	20,50	20,80	Cicuito Abierto
831	12/05/2011	12:32:31	20,40	20,90	Cicuito Abierto
832	12/05/2011	12:33:14	20,50	20,80	Cicuito Abierto
833	12/05/2011	12:33:57	20,40	20,90	Cicuito Abierto
834	12/05/2011	13:06:10	20,40	20,90	Cicuito Abierto
835	12/05/2011	13:07:32	20,40	20,70	Cicuito Abierto
836	12/05/2011	13:07:58	20,30	20,80	Cicuito Abierto
837	12/05/2011	13:08:41	20,50	20,80	Cicuito Abierto
838	12/05/2011	13:09:23	20,40	20,80	Cicuito Abierto
839	12/05/2011	13:10:06	20,40	20,90	Cicuito Abierto
840	12/05/2011	13:10:49	20,40	20,80	Cicuito Abierto
841	12/05/2011	13:11:32	20,40	20,70	Cicuito Abierto
842	12/05/2011	13:12:14	20,30	20,80	Cicuito Abierto
843	12/05/2011	13:12:57	20,30	20,80	Cicuito Abierto
844	12/05/2011	13:17:52	20,30	20,80	Cicuito Abierto
845	12/05/2011	13:18:32	20,60	21,10	Cicuito Abierto
846	12/05/2011	13:19:15	20,50	20,80	Cicuito Abierto
847	12/05/2011	13:19:57	20,40	20,70	Cicuito Abierto
848	12/05/2011	13:20:40	19,90	20,50	Cicuito Abierto
849	12/05/2011	13:21:00	19,90	20,40	Cicuito Abierto
850	12/05/2011	13:21:43	19,90	20,50	Cicuito Abierto

En la tabla 5.1 se muestran los datos en columnas así: ítem (número de control), fecha con día-mes-año, hora con hora-minutos-segundos, voltaje del panel monocristalino en voltios, voltaje del panel policristalino y carga o resistencias (circuito abierto).

La tabla 5.1 muestra el 12 de mayo de 2011 desde las 12:26:50 hasta 13:21:43 horas, lapso importante porque es el momento en el que la radiación solar es más fuerte en la ciudad.

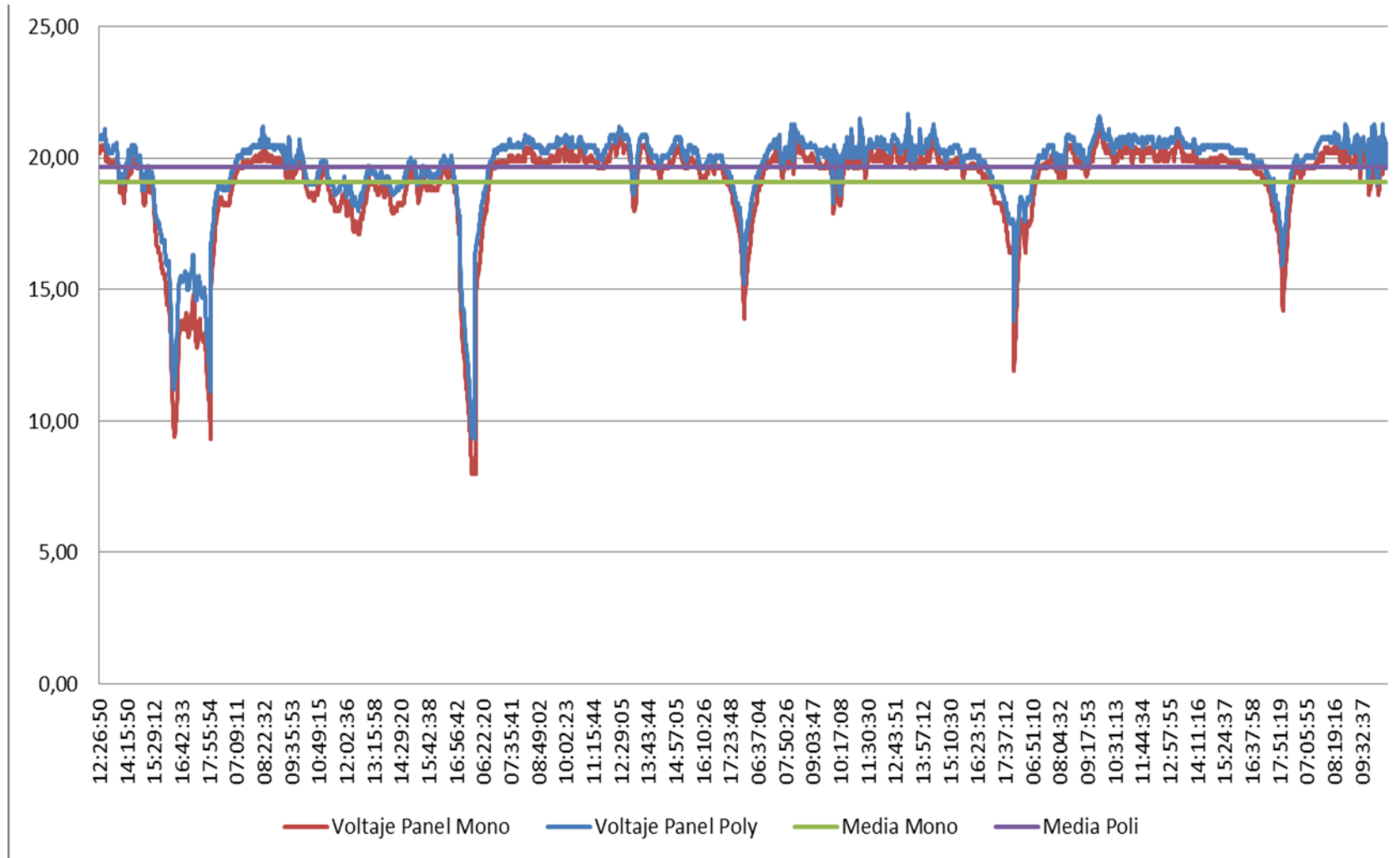
En la siguiente tabla se muestra la estadística de los voltajes de cada panel en circuito abierto. Ver Tabla 5.2 Estadística de los voltajes en circuito abierto.

**Ver Tabla 5.2 Estadística de los voltajes en circuito abierto**

<b><i>Voltaje Panel Mono Circuito Abierto</i></b>		<b><i>Voltaje Panel Poli Circuito Abierto</i></b>	
Media	19,07	Media	19,64
Error típico	0,03	Error típico	0,02
Mediana	19,70	Mediana	20,20
Moda	19,90	Moda	20,40
Desviación estándar	1,87	Desviación estándar	1,59
Varianza de la muestra	3,51	Varianza de la muestra	2,53
Rango	13,30	Rango	12,40
Mínimo	8,00	Mínimo	9,30
Máximo	21,30	Máximo	21,70
Suma	92121,50	Suma	94881,80
Cuenta	4831,00	Cuenta	4831,00

A continuación se muestra la gráfica que representa el comportamiento de los voltajes de los paneles en circuito abierto en general, del 12 al 17 de mayo de 2011. Ver Figura 5. 5. Voltajes en circuito abierto de los dos paneles.

**Figura 5. 5. Voltajes en circuito abierto de los dos paneles**



En la figura 5.5 se muestran los voltajes de los dos paneles donde puede observarse una diferencia entre el monocristalino, cuya media está ligeramente por debajo de 20V y la del policristalino que se encuentra más cercano a los 20V.

Los picos hacia abajo en el voltaje, corresponden a horas del día que son en la mañana, muy temprano 6:22:20 am, por ejemplo, o tiempo en la tarde 17:37:12, cuando el Sol se pone en el occidente.

### ***Algunas conclusiones:***

- Los voltajes de los dos paneles llegan a sus máximos hasta en un 92% aproximadamente.
- Tanto la corriente como la potencia son cero, debido a que los paneles se encuentran en circuito abierto.
- Aunque las variaciones de la radiación son evidentes en la figura 5.5, no afectan de manera significativa la salida de los voltajes.
- Por encontrarse en circuito abierto, las medidas de potencia son nulas y, por lo tanto, no hay consumo útil.

## **5.6 DATOS OBTENIDOS CON CARGA O RESISTENCIA DE 30 OHM**

Para medir corriente y potencia en los dos paneles, se conectaron resistencias que hacen las veces de carga de 30,2 Ohm en el monocristalino y de 30,3 Ohm en el policristalino. Estas cargas tienen la capacidad de disipar hasta 100 vatios de potencia.

Las medidas fueron tomadas entre el 17 y el 27 de mayo y entre el 1 y el 11 de junio de 2011, con los mismos intervalos de tiempo que en circuito abierto, 43 segundos. En la tabla 5.3 se muestran los valores de voltajes en voltios, corriente en amperios, potencia en vatios, temperatura en °C, radiación en W/m<sup>2</sup> y resistencias en ohmios. La tabla 5.3 es un muestreo de los datos totales tomados.

Para encontrar los valores de corriente, se utilizó la fórmula de la Ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

Según esta ley que se refleja en la ecuación (1), la corriente (I) es el cociente entre el voltaje (V) y la resistencia (R).

Para calcular la potencia (P), la ley de Ohm señala que se obtiene con el producto entre el voltaje (v) y la corriente (I), según la ecuación (2):

$$P = VI \quad (2)$$

En la siguiente tabla 5.3 se muestran los valores del 10 de junio de 2011 entre las 11:00:39 am y las 11:12:02. Esta es una muestra. Ver Tabla 5.3 voltajes de los paneles con carga de 300hm.

Los valores de radiación se calcularon con un algoritmo que se basa en la expresión de eficiencia máxima en los paneles:

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{R_{st}A} \times 100\% \quad (3)$$

Donde  $\eta_{\max}$  es la eficiencia máxima del panel,  $P_{\max}$  la potencia máxima,  $R_{st}$  es la radiación estándar de 1000 W/m<sup>2</sup> y A es el área del panel en m<sup>2</sup>. Para el panel monocristalino con un área de 0,4368 m<sup>2</sup> y una potencia máxima de 60W, se obtiene una eficiencia de 13,7%. Para el panel policristalino con un área de 0,4743 m<sup>2</sup> y la misma potencia máxima que el mono, se obtiene la eficiencia de 12,65%. Estos valores los ofrecen los fabricantes de los paneles.

A partir de la ecuación (3) se puede obtener la radiación máxima:

$$R_{\max} = \frac{P_{\max}}{\eta_{\max}A} \times 100\% \quad (4)$$

También se puede obtener los valores de radiación, a partir de la potencia así:

$$R = \frac{P}{\eta_{\max}C} \times 100\% \quad (5)$$

Donde C es un factor empírico igual a la relación entre la potencia y la potencia máxima:

$$C = \frac{P}{P_{\max}} \quad (6)$$

**Tabla 5.3 Voltajes de los paneles con carga de 30Ohm (muestra)**

Item	Fecha	Hora	Voltaje Panel Mono	Voltaje Panel Poly	Corriente Panel Mono	Corriente Panel Poly	Potencia panel Mono	Potencia panel Poly	Temperatura Panel Mono	Temperatura Panel Poly	Radiacion Panel Mono	Radiacion Panel Poly	Resistencias
			Voltios	Voltios	Amperios	Amperios	Vatios	Vatios	Grados C.	Grados C.	Watios/M2	Watios/M2	
16022	10/06/2011	11:00:39	17,6	18,2	0,58	0,60	10,26	10,93	59,0	64,0	712,61	730,43	30.2 y 30.3 ohm
16023	10/06/2011	11:01:21	18,1	18,7	0,60	0,62	10,85	11,54	57,0	62,0	753,68	771,11	30.2 y 30.3 ohm
16024	10/06/2011	11:02:04	19,8	20,3	0,66	0,67	12,98	13,60	60,0	64,0	901,90	908,71	30.2 y 30.3 ohm
16025	10/06/2011	11:02:47	18,0	18,6	0,60	0,61	10,73	11,42	59,0	63,0	745,37	762,89	30.2 y 30.3 ohm
16026	10/06/2011	11:03:30	17,3	18,0	0,57	0,59	9,91	10,69	57,0	62,0	688,53	714,46	30.2 y 30.3 ohm
16027	10/06/2011	11:04:12	17,1	17,6	0,57	0,58	9,68	10,22	56,0	60,0	672,70	683,06	30.2 y 30.3 ohm
16028	10/06/2011	11:04:55	16,8	17,7	0,56	0,58	9,35	10,34	55,0	58,0	649,30	690,85	30.2 y 30.3 ohm
16029	10/06/2011	11:05:38	16,9	17,7	0,56	0,58	9,46	10,34	54,0	58,0	657,06	690,85	30.2 y 30.3 ohm
16030	10/06/2011	11:06:20	17,6	18,1	0,58	0,60	10,26	10,81	53,0	57,0	712,61	722,42	30.2 y 30.3 ohm
16031	10/06/2011	11:07:03	20,2	20,8	0,67	0,69	13,51	14,28	54,0	58,0	938,71	954,03	30.2 y 30.3 ohm
16032	10/06/2011	11:07:46	18,6	19,1	0,62	0,63	11,46	12,04	56,0	60,0	795,89	804,45	30.2 y 30.3 ohm
16033	10/06/2011	11:08:29	17,6	18,3	0,58	0,60	10,26	11,05	54,0	59,0	712,61	738,48	30.2 y 30.3 ohm
16034	10/06/2011	11:09:11	17,3	18,0	0,57	0,59	9,91	10,69	53,0	58,0	688,53	714,46	30.2 y 30.3 ohm
16035	10/06/2011	11:09:54	17,5	18,0	0,58	0,59	10,14	10,69	52,0	56,0	704,54	714,46	30.2 y 30.3 ohm
16036	10/06/2011	11:10:37	17,8	18,3	0,59	0,60	10,49	11,05	52,0	56,0	728,90	738,48	30.2 y 30.3 ohm
16037	10/06/2011	11:11:20	17,9	18,4	0,59	0,61	10,61	11,17	51,0	55,0	737,11	746,57	30.2 y 30.3 ohm
16038	10/06/2011	11:12:02	17,8	18,5	0,59	0,61	10,49	11,30	50,0	54,0	728,90	754,71	30.2 y 30.3 ohm

Se presenta a continuación la estadística descriptiva de las medidas anteriores de voltaje con cargas de 30 Ohm. Ver Tabla 5.4 Estadística de voltajes con resistencia de 30 Ohm.

**Tabla 5.4 Estadística de voltajes con resistencia de 30 Ohm**

<i>Voltaje Panel Mono R = 30 ohm</i>		<i>Voltaje Panel Poli R = 30 ohm</i>	
Media	12,77	Media	13,60
Error típico	0,05	Error típico	0,05
Mediana	15,80	Mediana	16,90
Moda	18,80	Moda	19,90
Desviación estándar	6,76	Desviación estándar	6,66
Varianza de la muestra	45,70	Varianza de la muestra	44,33
Rango	20,90	Rango	21,30
Mínimo	0,00	Mínimo	0,00
Máximo	20,90	Máximo	21,30
Suma	255135,50	Suma	271733,30
Cuenta	19987,00	Cuenta	19987,00

En esta tabla 5.4 se evidencia que el voltaje promedio del panel monocristalino es de 12,77V y para el policristalino es de 13,59V; corresponden a porcentajes de 60% y 62% sobre los voltajes máximos en circuito abierto (21,30V y 21,70V respectivamente).

Así mismo, con respecto a lo suministrado por los fabricantes, los porcentajes de voltajes máximos alcanzados corresponden a 67% para el mono (20,9V) y del 77% para el poli (21,3V).

Estos valores de voltaje máximos equivalen al 98% con respecto a los obtenidos en circuito abierto. Además, algunos voltajes mínimos llegan a cero con este valor de resistencia.

La tabla 5.5 muestra la estadística descriptiva de corriente de los paneles con resistencia de 30 Ohm. Ver Tabla 5.5 Estadística de corriente con resistencia de 30 Ohm.



**Tabla 5.5 Estadística de corriente con resistencia de 30 Ohm**

<i>Corriente Panel Mono R = 30 ohm</i>		<i>Corriente Panel Poli R = 30 ohm</i>	
Media	0,42	Media	0,45
Error típico	0,00	Error típico	0,00
Mediana	0,52	Mediana	0,56
Moda	0,62	Moda	0,66
Desviación estándar	0,22	Desviación estándar	0,22
Varianza de la muestra	0,05	Varianza de la muestra	0,05
Rango	0,69	Rango	0,70
Mínimo	0,00	Mínimo	0,00
Máximo	0,69	Máximo	0,70
Suma	8448,20	Suma	8968,10
Cuenta	19987,00	Cuenta	19987,00

La tabla 5.6 muestra la estadística descriptiva de potencia de los paneles con resistencia de 30 Ohm. Ver Tabla 5.6 Estadística de potencia con resistencia de 30 Ohm.

**Tabla 5.6 Estadística de potencia con resistencia de 30 Ohm**

<i>Potencia Panel Mono R = 30 ohm</i>		<i>Potencia Panel Poli R = 30 ohm</i>	
Media	6,91	Media	7,56
Error típico	0,04	Error típico	0,04
Mediana	8,27	Mediana	9,43
Moda	11,70	Moda	13,07
Desviación estándar	4,97	Desviación estándar	5,12
Varianza de la muestra	24,70	Varianza de la muestra	26,17
Rango	14,46	Rango	14,97
Mínimo	0,00	Mínimo	0,00
Máximo	14,46	Máximo	14,97
Suma	138096,59	Suma	151174,17
Cuenta	19988,00	Cuenta	19988,00

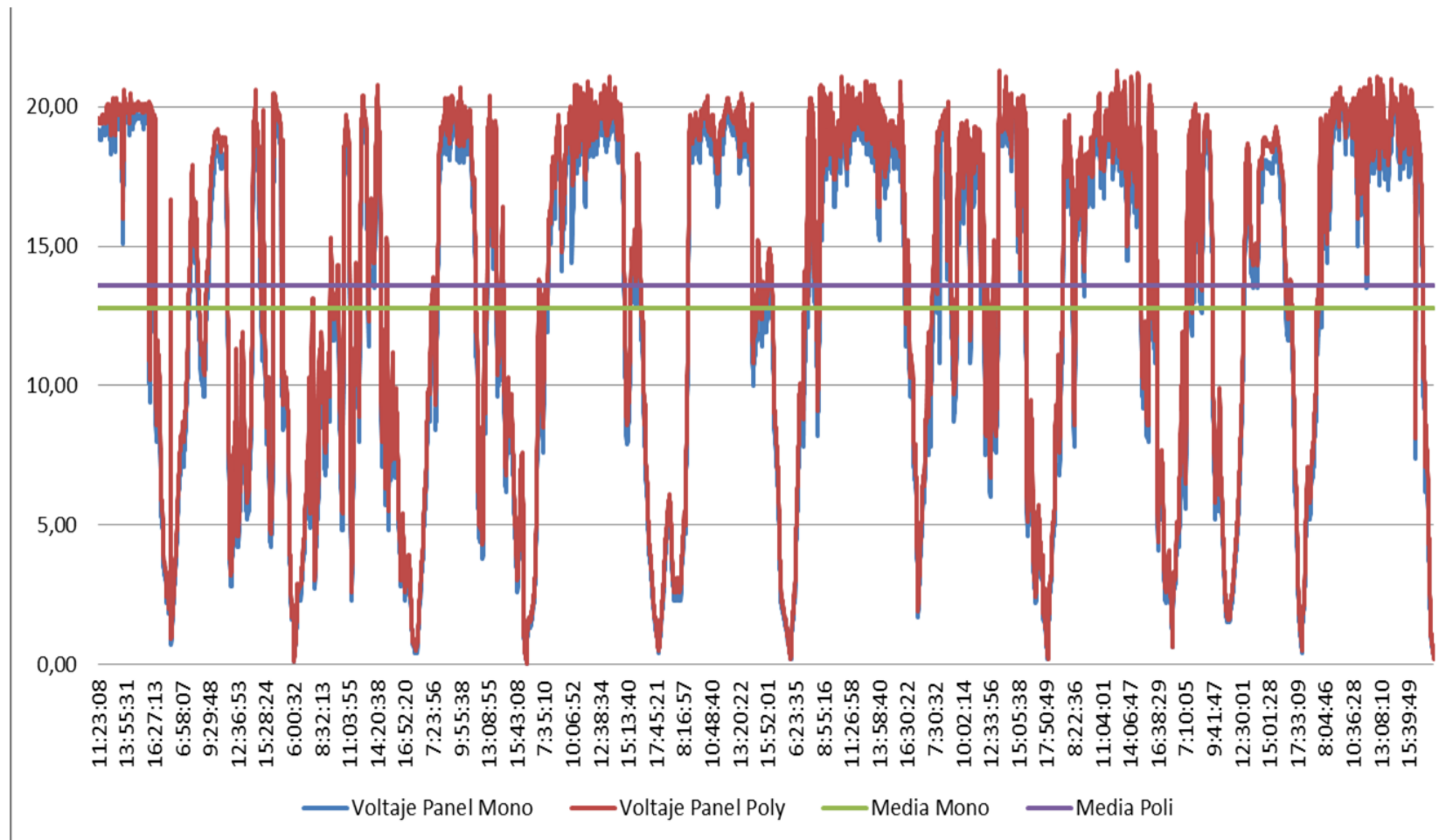
La tabla 5.7 muestra la estadística descriptiva de radiación de los paneles con resistencia de 30 Ohm. Ver Tabla 5.7 Estadística de radiación con resistencia de 30 Ohm.

**Tabla 5.7 Estadística de radiación con resistencia de 30 Ohm**

<i>Radiacion sobre Panel Mono R = 30 ohm</i>		<i>Radiacion sobre Panel Poli R = 30 ohm</i>	
Media	480,01	Media	505,34
Error típico	2,44	Error típico	2,42
Mediana	574,31	Mediana	629,81
Moda	813,10	Moda	873,25
Desviación estándar	345,26	Desviación estándar	341,83
Varianza de la muestra	119203,98	Varianza de la muestra	116846,67
Rango	1004,90	Rango	1000,45
Mínimo	0,00	Mínimo	0,00
Máximo	1004,90	Máximo	1000,45
Suma	9594415,94	Suma	10100780,96
Cuenta	19988,00	Cuenta	19988,00

A continuación se muestra el voltaje contra tiempo de los paneles con carga de 30 Ohm para mayo de 2011. Ver Figura 5.6 Voltajes con resistencia 30 Ohm para mayo.

Figura 5.6 Voltajes con resistencia 30 Ohm para mayo



A continuación se muestran algunas otras gráficas interesantes sobre rangos de voltajes y su frecuencia, ver Tablas 5.8 y 5.9. También se presentan histogramas de voltaje de los paneles (Ver Figura 5.7 y 5.8) con las siguientes condiciones:

Total horas de muestreo:  $10830 \times 43 \text{ s} = 129.35$

Total horas con voltaje mayor a 13.6 v:  $5881 \times 43 \text{ s} = 70.24$

Porcentaje: 54.30 %

**Tabla 5.8 Rangos de voltajes y frecuencias panel mono**

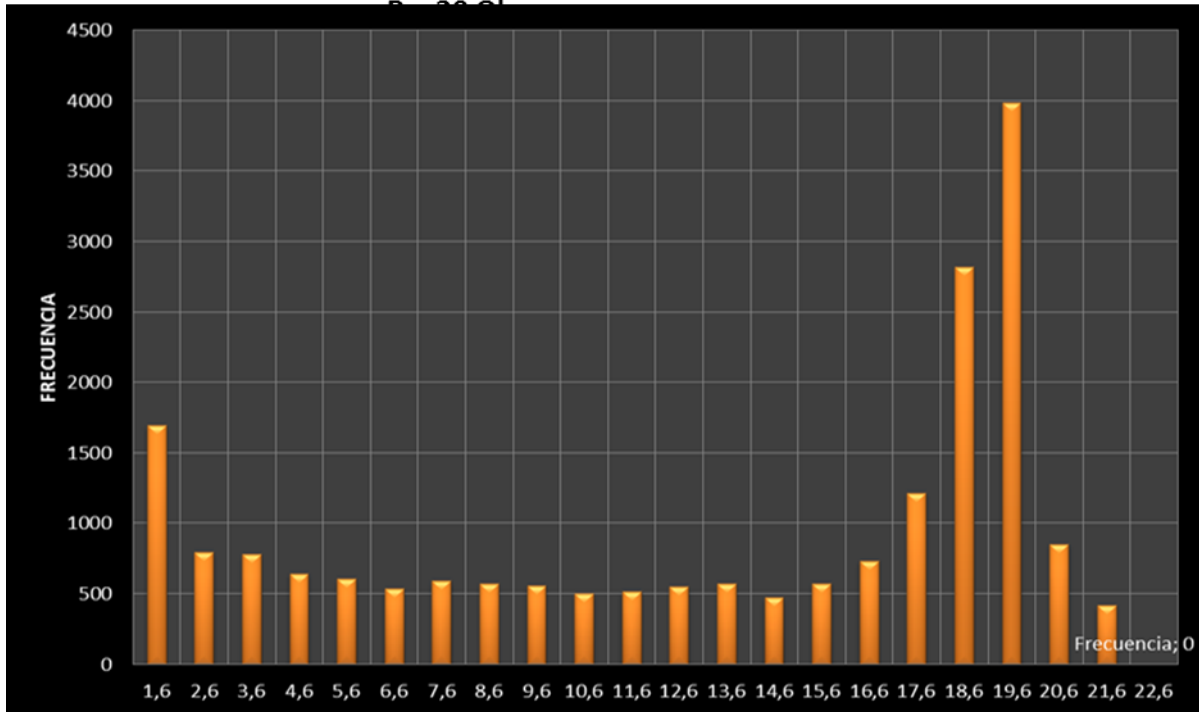
<i>Rango de Voltajes</i>	<i>Frecuencia</i>
1,6	1699
2,6	792
3,6	779
4,6	643
5,6	604
6,6	535
7,6	590
8,6	570
9,6	559
10,6	499
11,6	518
12,6	551
13,6	571
14,6	472
15,6	573
16,6	736
17,6	1216
18,6	2819
19,6	3989
20,6	854
21,6	418
22,6	0

**Tabla 5.9 Estadística de voltajes mono**

<i>Voltaje Panel Mono R = 30 ohm</i>	
Media	12,765
Error típico	0,048
Mediana	15,800
Moda	18,800
Desviación estándar	6,760
Varianza de la muestra	45,702
Curtosis	-1,215
Coefficiente de asimetría	-0,564
Rango	20,900
Mínimo	0,000
Máximo	20,900
Suma	255135,500
Cuenta	19987,000

Se presentan a continuación, histogramas de voltajes del panel monocristalino con resistencia de 30 Ohm. Ver Figura 5.7 Histograma voltajes mono con R = 30 Ohm.

Figura 5.7 Histograma de voltajes mono



A continuación se muestran gráficos sobre rangos de voltajes y su frecuencia para el panel policristalino. Ver Tablas 5.10 y 5.11. Las condiciones son las siguientes:

Total horas de muestreo:  $10830 \times 43 \text{ s} = 129.35$

Total horas con voltaje mayor a 13.6 v:  $6212 \times 43 \text{ s} = 74.19$

Porcentaje: 57.35 %

**Tabla 5.10 Rangos de voltajes y frecuencias**

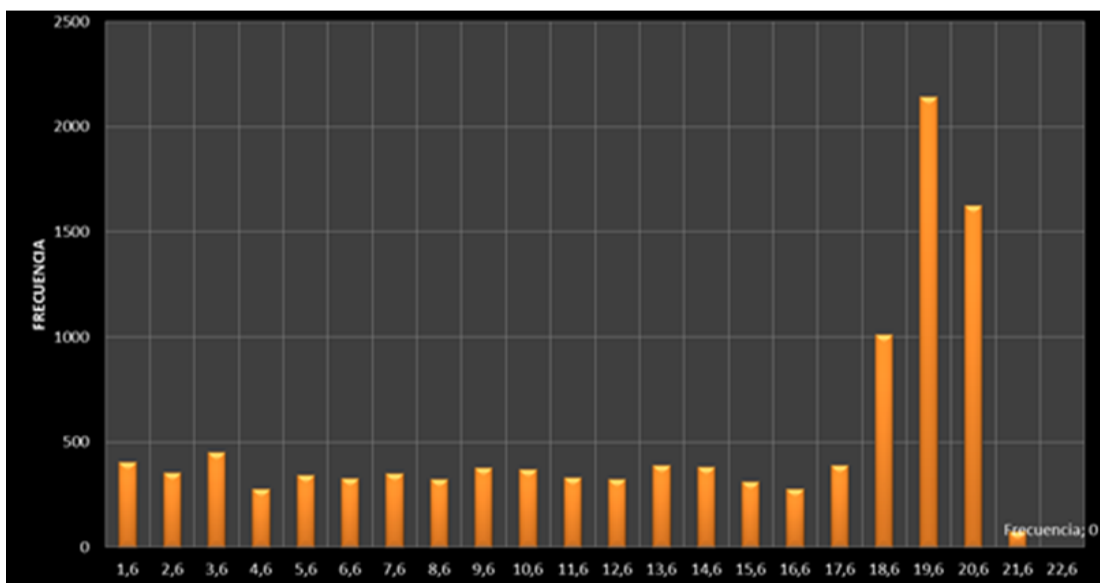
Rango de Voltajes	Frecuencia
1,6	403
2,6	353
3,6	451
4,6	276
5,6	343
6,6	326
7,6	352
8,6	324
9,6	378
10,6	370
11,6	330
12,6	324
13,6	388
14,6	380
15,6	310
16,6	278
17,6	391
18,6	1012
19,6	2141
20,6	1626
21,6	74
22,6	0

**Tabla 5.11 Estadística de voltajes poli**

Voltaje Panel Poli R = 30 ohm	
Media	13,604
Error típico	0,061
Mediana	16,000
Moda	19,900
Desviación estándar	6,333
Varianza de la muestra	40,106
Curtosis	-1,058
Coefficiente de asimetría	-0,623
Rango	21,300
Mínimo	0,000
Máximo	21,300
Suma	147333,800
Cuenta	10830,000

Se presenta a continuación el histograma de voltajes del panel policristalino con resistencia de 30 Ohm. Ver Figura 5.8 Histograma voltajes poli con R = 30 Ohm.

**Figura 5.8 Histograma voltajes poli con R = 30 Ohm**



Se presentan a continuación, las tablas de rangos de potencia y su frecuencia para el panel monocristalino. Ver Tabla 5.12 Rangos de potencias y frecuencias. También se muestra la estadística de las potencia del mono. Ver Tabla 5.13 Estadística de potencias mono.

**Tabla 5.12 Rangos de potencias y frecuencias**

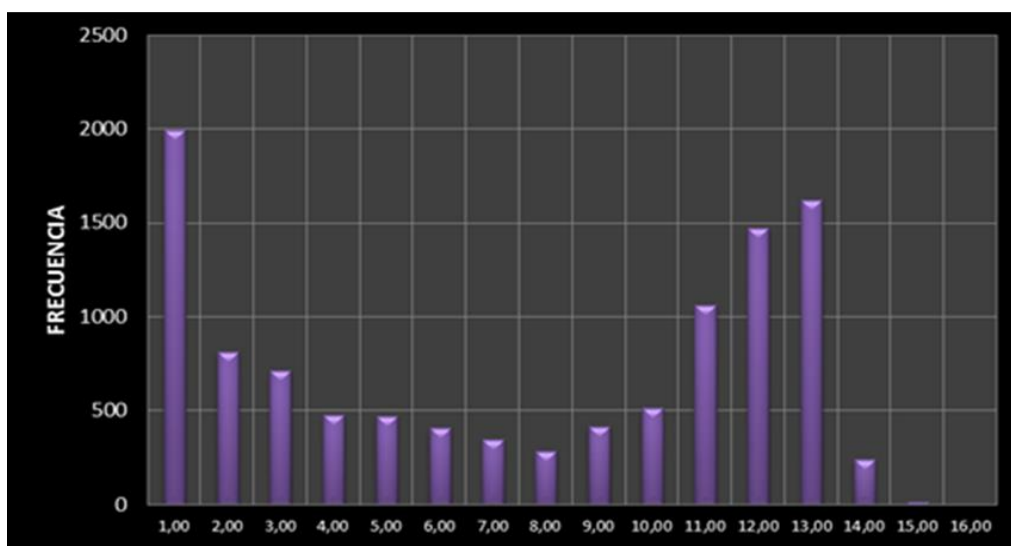
<i>Rango de Potencia</i>	<i>Frecuencia</i>
1,00	1994
2,00	810
3,00	713
4,00	476
5,00	471
6,00	405
7,00	345
8,00	282
9,00	417
10,00	511
11,00	1063
12,00	1469
13,00	1623
14,00	237
15,00	14
16,00	0

**Tabla 5.13 Estadística de potencias mono**

POTENCIA PANEL MONO	
Media	6,849519149
Error típico	0,045836649
Mediana	7,650331126
Moda	11,70331126
Desviación estándar	4,770
Varianza de la muestra	22,754
Curtosis	-1,608215287
Coefficiente de asimetría	-0,153
Rango	14,46390728
Mínimo	0
Máximo	14,46390728
Suma	74180,29238
Cuenta	10830

Se muestra a continuación el histograma de potencias del mono. Ver Figura 5.9 Histograma de potencias del mono con R = 30 Ohm.

**Figura 5.9 Histograma de potencias del mono con R = 30 Ohm**



Se presentan a continuación, las tablas de rangos de potencia y su frecuencia para el panel policristalino. Ver Tabla 5.14 Rangos de potencias y frecuencias. También se muestra la estadística de las potencia del poli. Ver Tabla 5.15 Estadística de potencias poli.

**Tabla 5.14 Rangos de potencias y frecuencias**

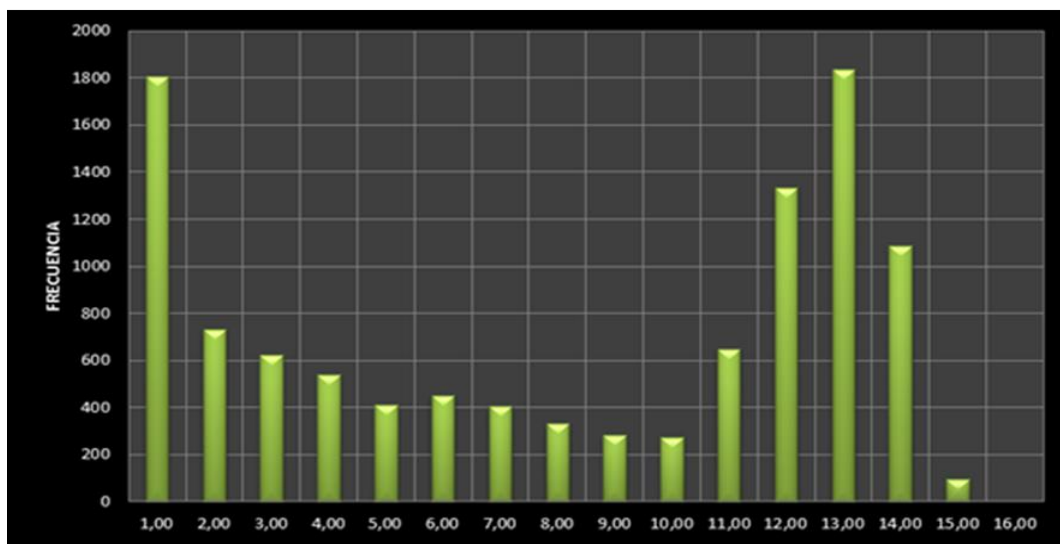
<i>Rango de Potencia</i>	<i>Frecuencia</i>
1,00	1806
2,00	731
3,00	620
4,00	536
5,00	409
6,00	449
7,00	404
8,00	329
9,00	281
10,00	271
11,00	648
12,00	1332
13,00	1833
14,00	1085
15,00	96
16,00	0

**Tabla 5.15 Estadística de potencias poli**

<b>POTENCIA PANEL POLY</b>	
Media	7,431581934
Error típico	0,047678054
Mediana	8,448844884
Moda	13,06963696
Desviación estándar	4,962
Varianza de la muestra	24,619
Curtosis	-1,582029112
Coefficiente de asimetría	-0,231
Rango	14,97326733
Mínimo	0
Máximo	14,97326733
Suma	80484,03234
Cuenta	10830

Se muestra a continuación, el histograma de potencias del policristalino. Ver Figura 5.10 Histograma de potencias del poli con R = 30 Ohm.

**Figura 5.10 Histograma de potencias del poli con R = 30 Ohm**





## 5.7 DATOS Y GRÁFICOS SOBRE LOS PROMEDIOS DIARIOS DE TODAS LAS VARIABLES

Se muestran los datos de los promedios de las variables medidas en el mes de julio de 2011. La tabla que se muestra a continuación detalla la siguiente información:

Fecha, Voltaje panel mono, panel poli, Corriente mono y poli, Temperatura mono y poli, Radiación mono y poli, Observaciones. Ver Tabla 5.16 Datos de los promedios diarios de las variables en julio 2011.

Se tomaron los promedios de cada variable por día desde el 01/07/2011 hasta el 31/07/2011.

Se puede ver que se variaron las resistencias en un rango de  $R = 5.3\Omega$  a  $R = 16.1\Omega$ .

En las gráficas que siguen se puede analizar el comportamiento de las variables de la tabla 5.16.

Se grafican los promedios diarios mono y poli de: voltaje, corriente, potencia, temperatura y radiación.

Finalmente se muestran las gráficas de potencia y voltajes de todo el mes de julio de 2011, así como los histogramas de voltaje con  $R = \infty$  para el mono y el poli, con sus respectivas tablas de rango de voltajes y frecuencias. También se muestran histogramas de voltajes con  $R = 30\Omega$  para mono y poli, con sus tablas de rango de voltajes y frecuencias.

Tabla 5.16 Datos de los promedios diarios de las variables en julio 2011

Fecha	Voltaje Panel Mono	Voltaje Panel Poly	Corriente Panel Mono	Corriente Panel Poly	Potencia panel Mono	Potencia panel Poly	Temperatura Panel Mono	Temperatura Panel Poly	Radiacion Panel Mono	Radiacion Panel Poly	Observaciones
	Voltios	Voltios	Amperios	Amperios	Wattios	Wattios	Grados C.	Grados C.	Wattios/M2	Wattios/M2	
7/2011	6,95	8,22	0,85	0,97	8,34	10,70	37,48	39,53	169,59	212,27	P-Mono R=8,2 P-Poly R=
7/2011	4,02	8,88	0,55	0,98	3,38	12,09	34,70	36,81	83,73	362,83	P-Mono R=8,2 P-Poly R=8, las 14:45:09, P-Mono R= Poly R=11.6 a las 14:45: adelante
7/2011	5,38	11,03	1,02	0,95	8,59	13,83	40,44	42,20	330,55	1084,61	P-Mono R=5,3 P-Poly R=
7/2011	4,85	10,96	0,92	0,94	6,20	12,98	37,67	39,45	238,72	1018,51	P-Mono R=5,3 P-Poly R=
7/2011	3,86	8,61	0,73	0,74	4,79	9,03	36,22	38,60	184,41	708,25	P-Mono R=5,3 P-Poly R=
7/2011	1,90	4,95	0,36	0,43	1,02	2,95	27,02	27,06	39,19	231,16	P-Mono R=5,3 P-Poly R=
7/2011	5,70	11,76	1,08	1,01	9,02	15,38	39,70	39,41	347,37	1206,47	P-Mono R=5,3 P-Poly R=
7/2011	4,03	8,95	0,76	0,77	5,06	9,33	34,77	36,81	194,67	731,83	P-Mono R=5,3 P-Poly R=
7/2011	4,14	9,30	0,78	0,80	5,16	10,06	37,21	33,83	198,52	789,28	P-Mono R=5,3 P-Poly R=
7/2011	5,17	10,55	0,97	0,91	8,17	13,30	39,44	37,90	314,54	1043,06	P-Mono R=5,3 P-Poly R=
7/2011	6,58	7,03	0,79	0,83	7,49	8,13	37,65	34,54	390,21	575,40	P-Mono R=5,3 P-Poly R=11 las 12:23:48, P-Mono R= Poly R=5,3 a las 12:24: adelante
7/2011	9,16	4,31	0,79	0,81	9,78	5,42	36,32	33,21	582,36	311,38	P-Mono R=11,6 P-Poly R=
7/2011	7,22	3,12	0,62	0,59	6,13	2,66	31,75	32,08	364,93	153,19	P-Mono R=11,6 P-Poly R=
7/2011	5,61	2,55	0,48	0,48	3,83	1,87	28,23	30,68	228,11	107,43	P-Mono R=11,6 P-Poly R=
7/2011	5,50	2,40	0,47	0,45	4,21	1,86	27,84	29,47	201,83	80,37	P-Mono R=11,6 P-Poly R=5 las 12:12:22, P-Mono R= Poly R=5,4 a las 12:13: adelante
7/2011	10,57	5,22	0,90	0,97	12,43	7,74	38,59	40,57	363,74	137,32	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	7,53	3,53	0,64	0,65	7,45	4,16	31,16	34,13	217,97	73,84	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	9,19	4,56	0,79	0,84	10,73	6,92	36,67	38,64	313,83	122,73	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	9,71	4,68	0,83	0,87	11,27	6,67	38,44	40,67	329,54	118,24	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	7,70	3,36	0,66	0,62	6,76	3,17	32,93	35,45	197,61	56,14	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	8,00	3,41	0,68	0,63	7,38	3,10	33,31	36,16	215,94	54,96	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	6,95	3,00	0,59	0,56	5,65	2,69	33,75	35,67	165,35	47,63	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	8,24	3,47	0,70	0,64	7,35	2,92	30,65	31,73	215,02	51,76	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	11,62	5,77	0,99	1,07	15,19	9,00	38,54	39,12	444,25	159,59	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	9,27	4,33	0,79	0,80	10,48	5,73	35,10	35,97	306,55	101,64	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	9,64	0,93	0,65	0,17	8,76	0,54	36,22	36,80	313,40	9,63	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	10,92	5,32	0,68	1,06	9,92	12,02	34,98	34,62	736,22	406,51	P-Mono R=11,7 P-Poly R=
7/2011	11,95	0,42	0,74	0,08	11,15	0,13	37,68	37,65	655,20	4,54	P-Mono R=16,1 Bateria i hasta 10:38:40, P-Mono R= Poly Bateria desde 10:46: adelante
7/2011	7,85	0,05	0,49	0,00	5,73	0,00	30,17	31,40	212,34	0,02	P-Mono R=16,1 P-Poly R=
7/2011	9,19	0,38	0,57	0,02	7,82	0,19	46,07	22,68	289,82	13,15	P-Mono R=16,1 P-Poly R=
7/2011	12,01	0,16	0,75	0,01	11,42	0,02	41,57	32,34	423,32	1,20	P-Mono R=16,1 P-Poly R=

Gráficos de los promedios:

Figura 5.11 Promedio diario de voltajes mono /poli

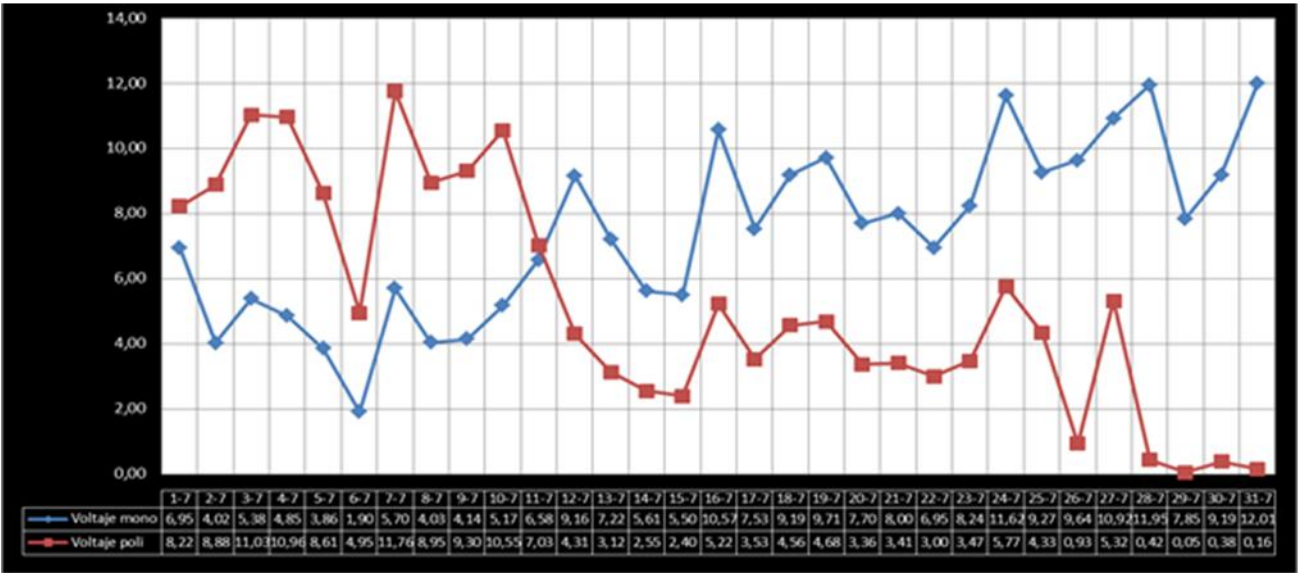


Figura 5.12 Promedios diarios de corriente mono/poli

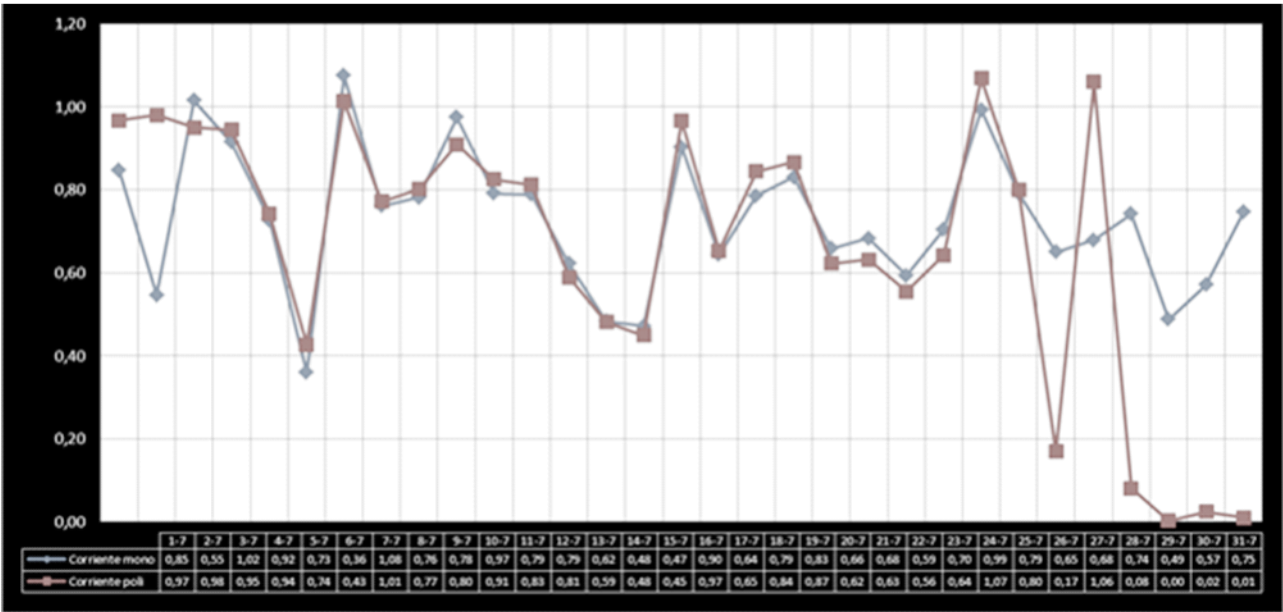


Figura 5.13 Promedios diarios de potencia mono/poli

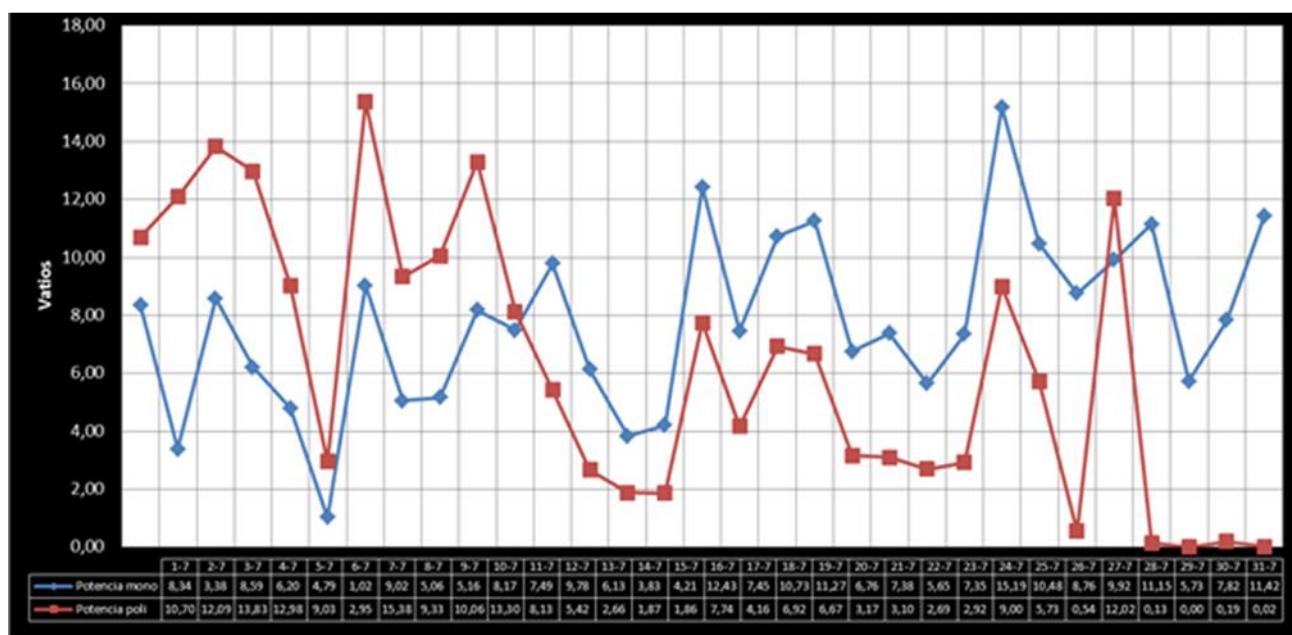


Figura 5.14 Promedios diarios de temperatura mono/poli

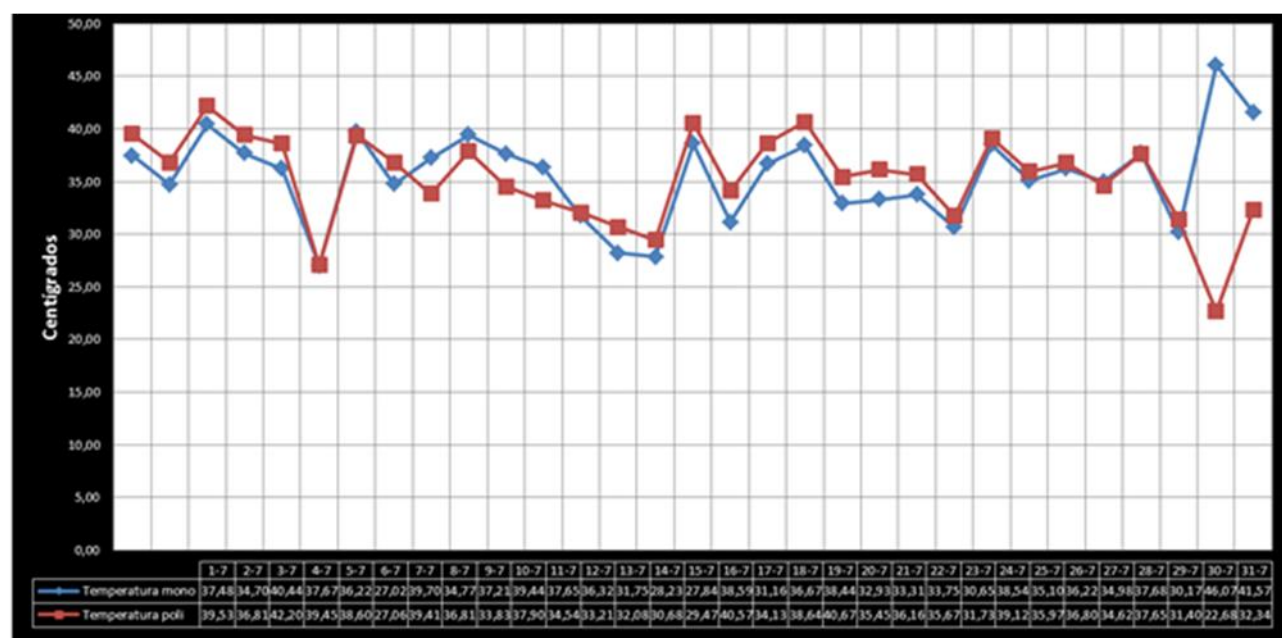
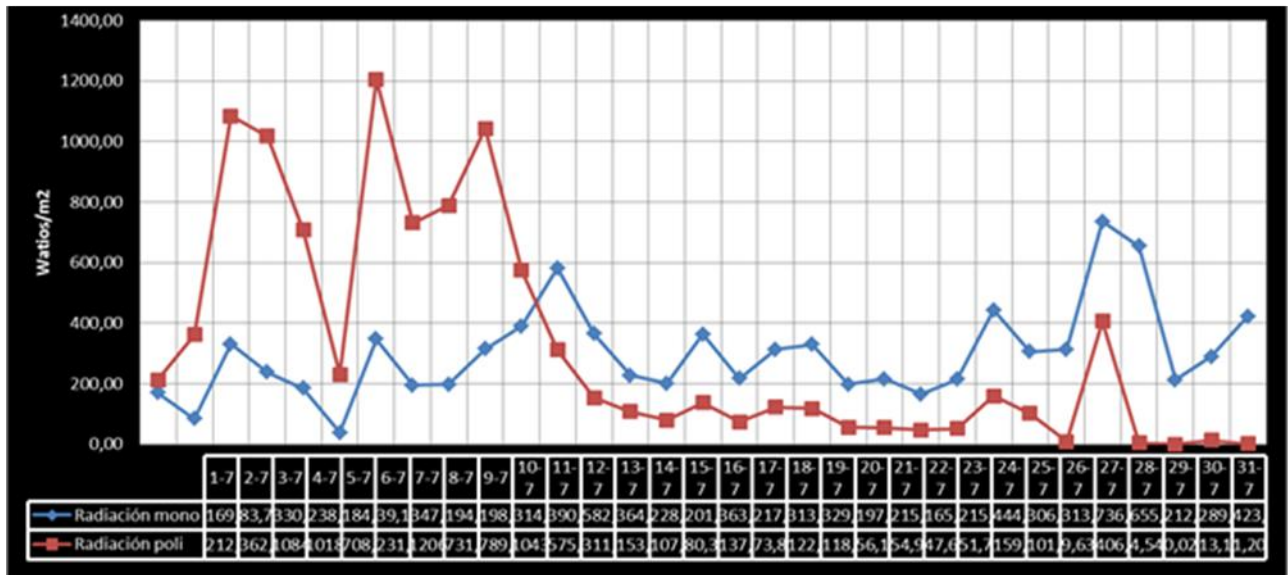


Figura 5.15 Promedios diarios de radiación mono/poli



El siguiente gráfico es el de potencia de todo el mes de julio de 2011

Figura 5.16 Potencias mono/poli julio 2011

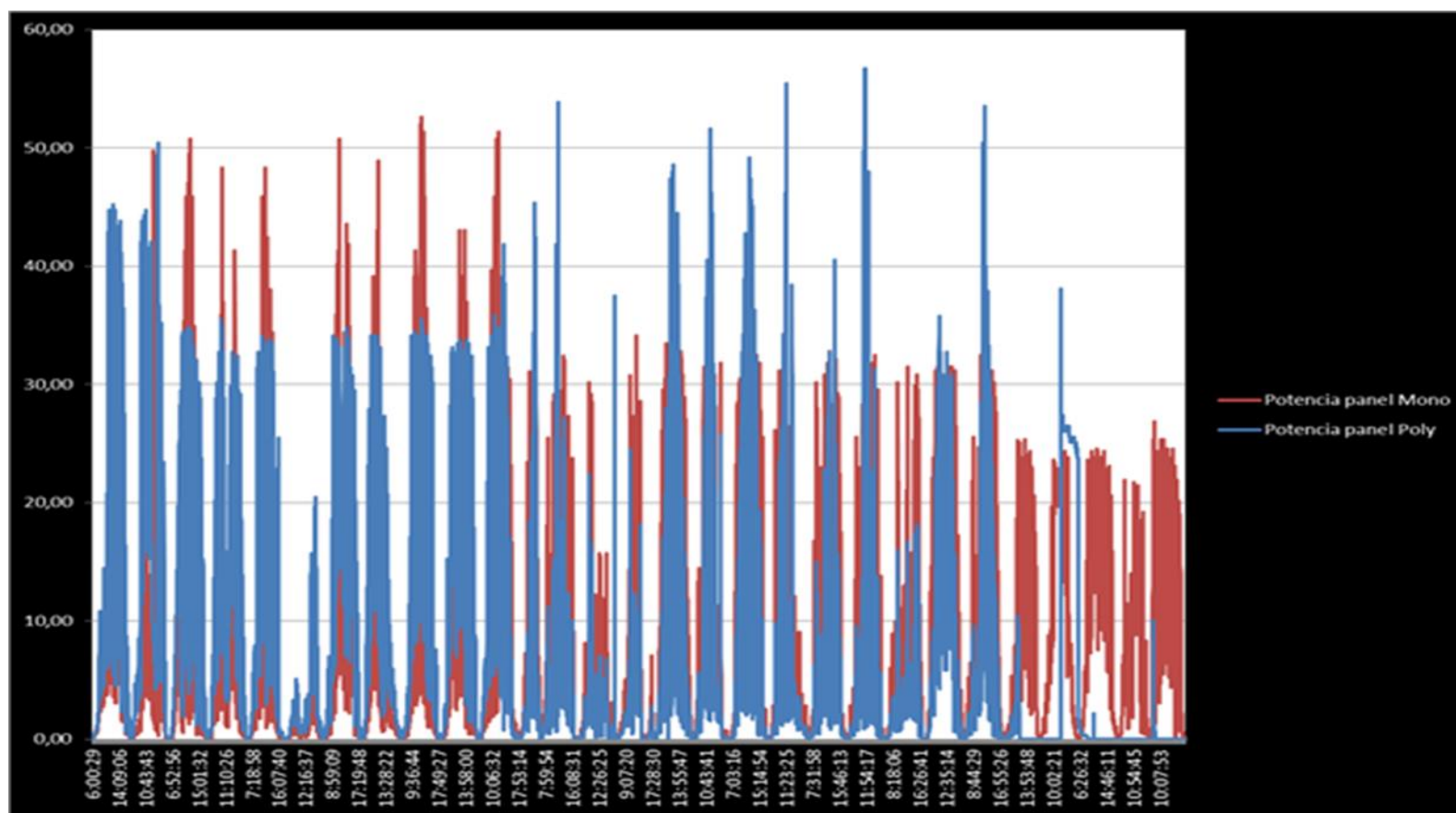
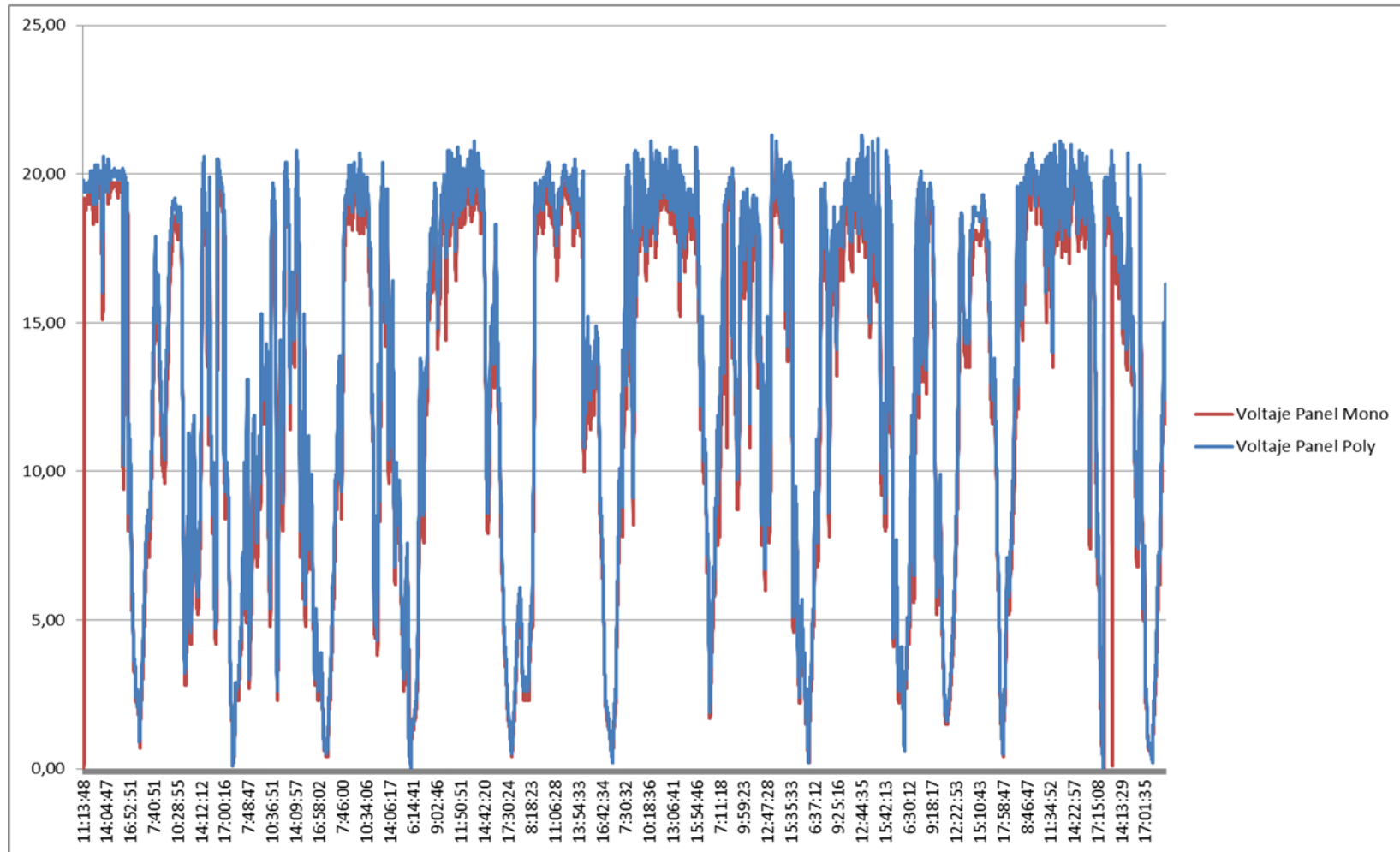




Figura 5.17 Voltajes mono/poli julio 2011



Por último se muestran gráficos de las variaciones de voltajes, corrientes y potencias contra carga y, variaciones de voltaje y potencia contra la radiación de los dos paneles.

Figura 5.18 Voltajes máximos mono/poli contra carga

Tabla 5.17 Carga contra voltajes máximos mono/poli

Resistencia de Carga	V Max P Mono	V Max P Poli
0,00	0,00	0,00
5,30	16,70	16,90
8,30	20,60	21,10
11,60	20,40	20,70
30,00	20,90	21,30
1000000,00	21,30	21,70

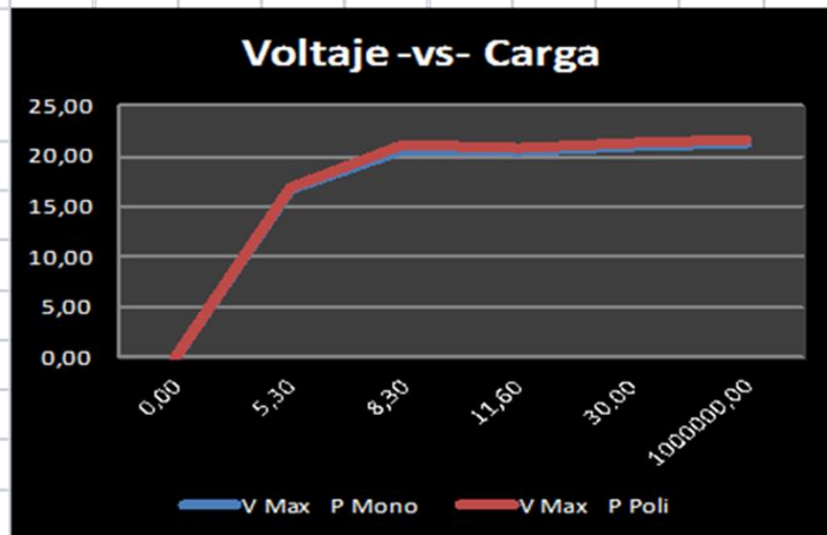


Tabla 5.18 Corriente máxima mono/poli contra carga

Resistencia de Carga	I Max P Mono	I Max P Poli
0,00	3,20	3,25
5,30	3,15	3,19
8,30	2,46	2,44
11,60	1,76	1,78
30,00	0,69	0,70
1000000,00	0,00	0,00

Figura 5.19 Corriente máxima mono/poli contra carga

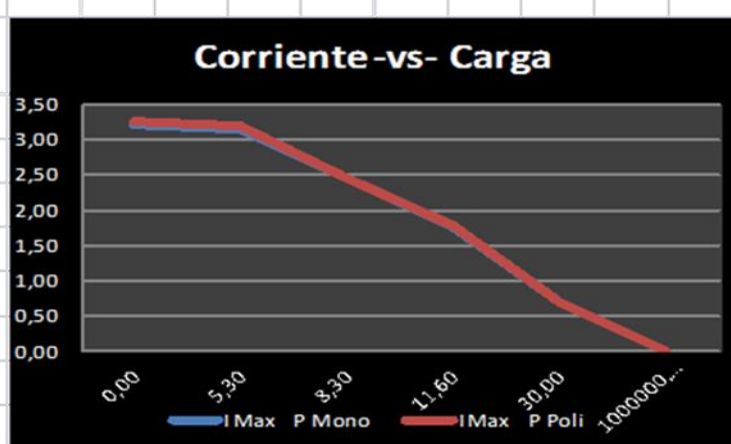
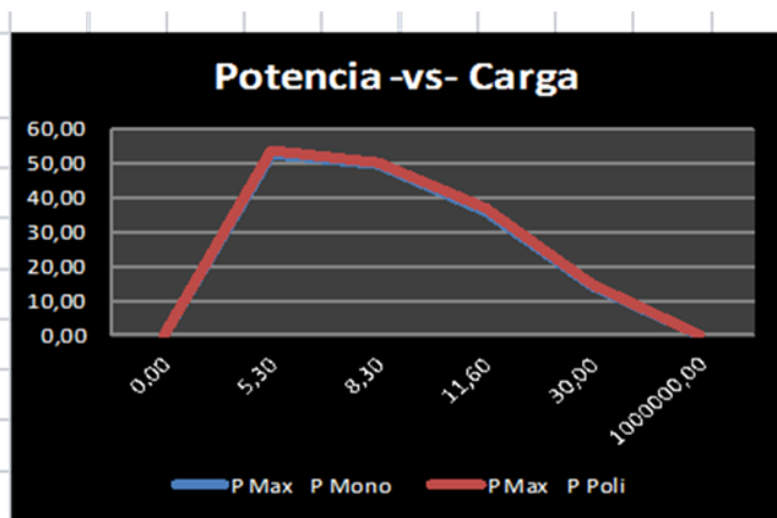




Tabla 5.19 Potencia máxima mono/poli contra carga

Potencia Maxima	P Max P Mono	P Max P Poli
0,00	0,00	0,00
5,30	52,62	53,89
8,30	49,76	50,41
11,60	35,88	36,94
30,00	14,46	14,97
1000000,00	0,00	0,00

Figura 5.20 Potencia máxima mono/poli contra carga



Se muestran a continuación gráficos de variaciones de voltajes mono/poli contra radiación

Figura 5.21 Voltajes mono/poli contra radiación

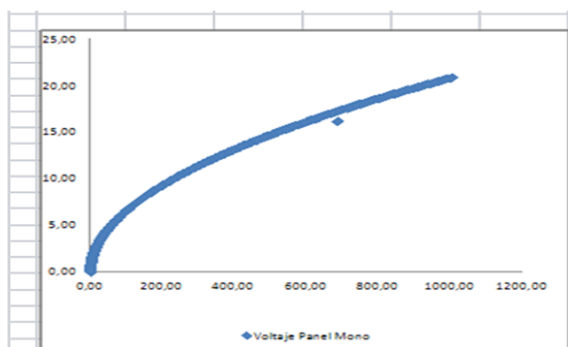
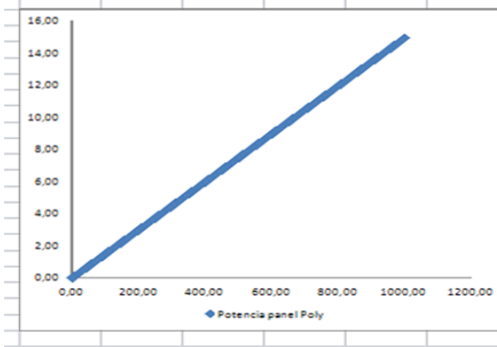
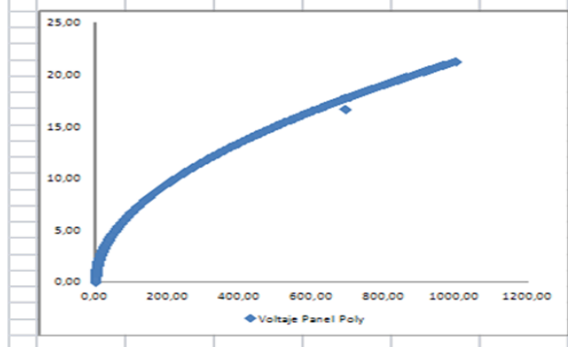
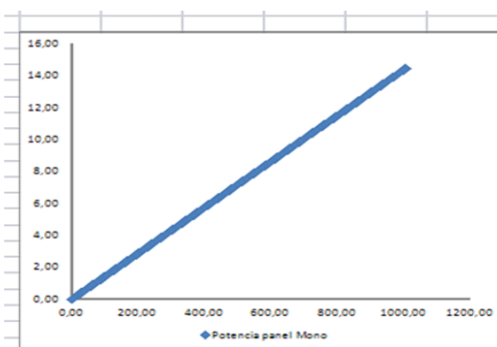


Figura 5.22 Potencias mono/poli contra radiación



## ***CAPÍTULO VI OTROS APORTES Y CONCLUSIONES GENERALES***

### **6.1 OTROS APORTES**

Los datos y análisis aquí realizados hacen parte de un proyecto de investigación que se realizó en la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá sobre uso de energía solar fotovoltaica en la ciudad.

Algunos aportes que surgieron como parte del presente estudio son los siguientes:

- La instalación de dos sistemas fotovoltaicos en la sede social de la Universidad para el estudio de la energía solar fotovoltaica. Ver Figura 6.1 Fotos de paneles instalados.

**Figura 6.1 Fotos de paneles instalados**



- Creación de un laboratorio de energía solar fotovoltaica donde se instalaron los equipos de los sistemas de paneles y se llevó adelante los análisis y conclusiones. También se han adquirido equipos de medición para la investigación en ésta área de las energías renovables (energía fotovoltaica). Además ha servido como lugar de formación de estudiantes en el área de energía solar fotovoltaica. Ver Figura 6.2 Laboratorio de energía solar fotovoltaica.

**Figura 6.2 Laboratorio de energía solar fotovoltaica y equipos**



**Sala de experimentación**



**Multímetro**



**Medidor de radiación**



**Interfaz**



**Fuente de voltaje**

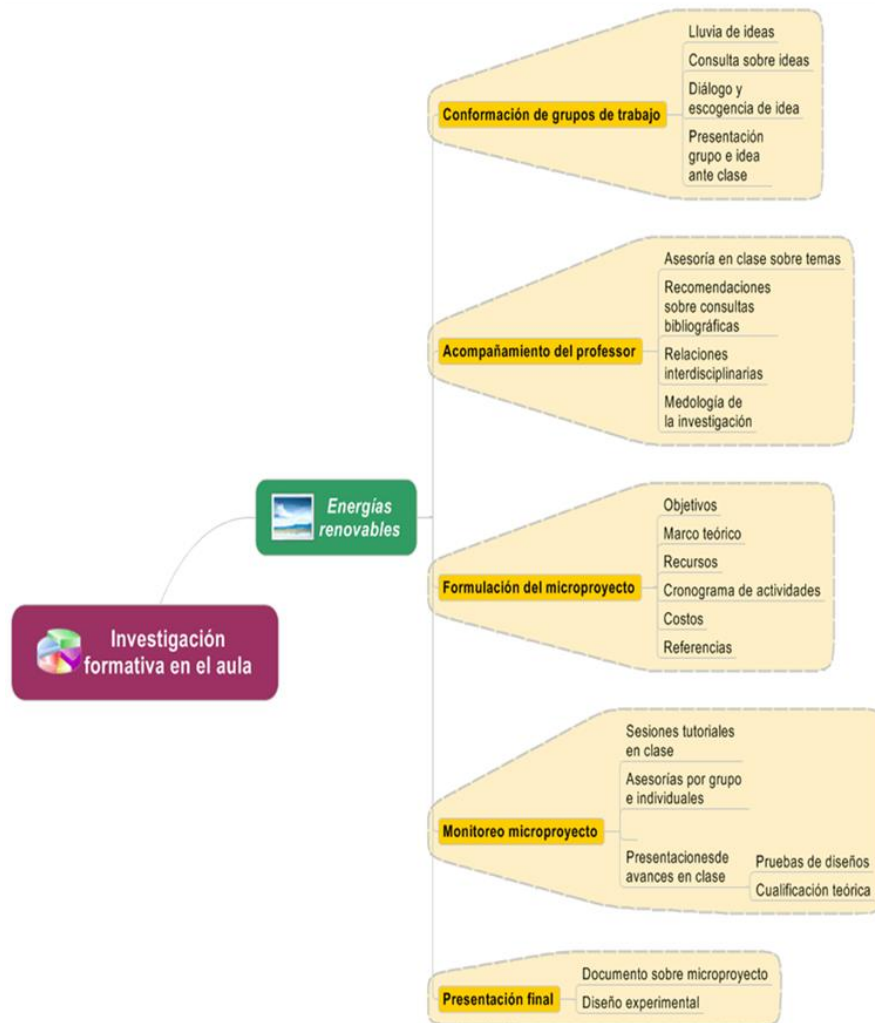


**PC**

- Investigación formativa para estudiantes y proyectos de aula.

La investigación formativa permite a los estudiantes adquirir responsabilidad frente a su propio proceso de aprendizaje. Algunos de los proyectos elaborados por los estudiantes tuvieron como temática principal el uso de las energías renovables. La metodología a seguir puede resumirse en el siguiente gráfico. Ver Figura 6.3 Investigación formativa.

**Figura 6.3 Investigación formativa**



**Fuente: propia**

Algunas conclusiones importantes sobre experiencias de investigación formativa con estudiantes son las siguientes:

- ❖ Se adquirió conocimiento sobre lo que significa las energías renovables y el potencial de uso para mejorar la eficiencia energética.
- ❖ Con pequeñas ideas como las realizadas, se puede generar energía a pequeña escala que pueda suplir necesidades básicas.
- ❖ Se adquiere conciencia sobre la emergencia ambiental y energética que vive el planeta y nuestro país.

- ❖ Se conocen las fuentes más importantes de energías renovables en nuestro territorio.

Se muestran algunas experiencias en fotos. Ver Figura 6.4 Proyectos de aula con estudiantes de ingeniería de la UCC.

**Figura 6.4 Proyectos de aula con estudiantes de ingeniería de la UCC**



**Cocina solar**



**Aprendizaje**



**Generadores de energía limpia**



**Biodigestor**



**Taller energía fotovoltaica**

- Participación en eventos de divulgación de resultados como:
  - VI Jornada Internacional Ciencia, Tecnología y Sociedad, noviembre 18 al 20 de 2009, en la sede Bogotá, UCC. Ponencia: Las energías renovables: energía solar fotovoltaica. Reflexión sobre el deterioro ambiental y el costo y contaminación que generan las energías no renovables.
  - VII Jornada Internacional Ciencia, Tecnología y Sociedad, noviembre 17 al 19 de 2010, en sede Bogotá, UCC. Taller sobre energía solar fotovoltaica.
  - VIII Jornada Internacional Ciencia, Tecnología y Sociedad, noviembre 16 al 18 de 2011, en sede Bogotá, UCC. Conferencia interactiva: Energías renovables, vislumbrando relaciones más inteligentes con el medio.

- Campus Party 2011: participación en este evento realizado en Corferias, junio 27 al 3 de julio de 2011, donde se tuvo la oportunidad de hacer una presentación general del proyecto.
- Planteamiento nuevas tesis y cooperación con otros grupos:
  - Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía (LIFAE), de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Avalado por Colciencias, categoría D.
  - Grupo de Materiales Semiconductores y Energía Solar, de la Universidad Nacional de Colombia. Avalado por Colciencias, categoría A.
  - Se trabajó con la empresa Ecoenergy en la elaboración del taller sobre energía fotovoltaica en la VII Jornada Internacional Ciencia, Tecnología y Sociedad.
  - Propuesta de crear línea transversal de trabajo sobre energías renovables.
  - Proyecto: Estudio comparativo entre tecnologías de iluminación, se encuentra en ejecución.
  - Se proyecta realizar estudios con comunidades vulnerables con necesidades de suministro de energía en regiones cercanas de la ciudad de Bogotá.
  - Se proyecta establecer una estación meteorológica en la sede centro de la UCC.
- Formación del recurso humano:
  - Investigación dirigida: Diseño e implementación de un seguidor solar. Terminado.
  - Investigación dirigida: Diseño, desarrollo e implementación de software que almacene y visualice datos tomados de un sistema de captación de energía fotovoltaica por el puerto USB. Terminado.
  - Investigación dirigida: Estudio comparativo entre dos sistemas fotovoltaicos con y sin seguidor solar bajo las condiciones climáticas de Bogotá, terminado.
  - Proyecto (próximo a convertirse en investigación dirigida) de creación de un sitio web para visualización y análisis de datos tomados de un sistema fotovoltaico.

- Publicaciones hechas:
  - Artículo revista Ingeniería Solidaria. Título: Estudio para el uso de la tecnología solar fotovoltaica.
  - Ponencia: Estudio comparativo entre paneles fotovoltaicos bajo condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá.
    - Ponencia presentada en: XXIV Congreso Nacional de Física. Hotel Tequendama, Bogotá, 3 al 7 de octubre de 2011.
    - ISBN: 978-958-761-025-3

## 6.2 CONCLUSIONES GENERALES SOBRE DATOS Y MEDIDAS

- ✓ Se evidencia una proporcionalidad entre el voltaje de los paneles y las cargas.
- ✓ Comparando los voltajes teóricos (fabricación) con los voltajes experimentales, se muestra que el valor máximo se obtiene en circuito abierto.
- ✓ Cuando la carga para cada panel decrece, también disminuyen los valores máximos alcanzados de 21.3V mono y 21.7V poli a 20.9V y 21.3V respectivamente con carga de 30  $\Omega$ .
- ✓ En la relación voltajes promedio y carga, se evidencia una variación significativa, aumentan en circuito abierto y disminuyen con la carga, por ejemplo, inician en 19.07V mono y 19.64V poli, luego llegan a 12.77V mono y 13.60V poli con carga de 30  $\Omega$ .
- ✓ Cuando se analizan los voltajes pequeños o mínimos, se puede ver que también varían, aunque en circuito abierto el voltaje no disminuye hasta cero en el lapso de 6:00 a 18:00 horas.
- ✓ Cuando se conecta carga al sistema los valores de voltaje alcanzan el cero en intervalos cada vez más grandes, en la medida en que disminuye la carga en los lapsos de 6:00 a 8:00 horas y de 16:00 a 18:00 horas.
- ✓ Los paneles alcanzan valores mínimos de voltaje de 8.0V mono y 9.3V poli en circuito abierto; con carga llegan a 0.0V ambos paneles.
- ✓ Al graficar los valores de voltaje contra curva se presenta un comportamiento de los paneles que sigue la Ley de Ohm, es decir, el voltaje llega a ser cero, cuando se tiene



una carga de  $0\ \Omega$  o está en cortocircuito, pero puede incrementarse con cargas de mayor valor a  $1k\Omega$ .

- ✓ Al analizar la curva de corriente puede encontrarse que también cumple con la Ley de Ohm, pero a la inversa del voltaje. Es decir, con cargas de  $0\Omega$  y cortocircuito, los valores máximos son de 3.25A mono y 3.55A poli, disminuyendo cuando la carga aumenta.
- ✓ La gráfica de potencia es producto del voltaje y la corriente; en cortocircuito es cero debido a que el voltaje es cero y aumenta en la medida en que lo hace la carga.
- ✓ Las medidas de radiación muestran que se alcanzan los máximos valores en los intervalos de 10:00 horas y 14:00 horas. Los valores máximos calculados están por el orden de  $1000W/m^2$ .
- ✓ La potencia y el voltaje varían de manera proporcional con respecto a la radiación: la potencia lo hace en forma lineal, mientras que el voltaje lo hace en forma cuadrática.
- ✓ Esta investigación constituye un aporte sobre el uso de la energía solar fotovoltaica en la ciudad de Bogotá.
- ✓ Los datos que aquí se analizan pueden ser la base de estudios de factibilidad económica sobre la energía fotovoltaica en la ciudad.
- ✓ Este estudio significa un paso más para la Universidad Cooperativa de Colombia, hacia consolidar la investigación en el área de la energía solar.

### 6.3 OTRAS CONCLUSIONES GENERALES VALIOSAS

Los humanos vivimos en un planeta de energía y en un universo energético. Esta condición, determina todas las actividades culturales y biológicas que la especie ha emprendido en toda su historia. Lo más sobresaliente es el significado del surgimiento de la especie humana sobre la Tierra.

El *Homo/femina sapiens/demens* (unión de sabiduría y locura en el hombre, según Morin) como se ha designado, así misma la especie humana, encarna, hasta lo que sabemos, la evolución de la conciencia. Pletórico de contrastes, su aprendizaje sobre la vida ha transcurrido entre formas de organización primitivas, azarosas y llenas de peligro, hasta



estructuras fatigantes y esclavistas como las actuales. Ha trasegado su propia existencia en el afán de lograr enarbolar su llamada condición de “especie más inteligente” y, el sacrificio que ello ha implicado no sólo ha afectado a la humanidad entera, sino a todo el planeta Tierra. Su máximo logro: la civilización y de ella, la construcción de un modelo cuya base ideológica tiene que ver con una batalla constante entre la herencia de los impulsos animales y la concienciación de su aparición en el cosmos.

En tal sentido, esta forma de vida ha constituido un ensayo cuestionado en un muy alto porcentaje puesto que han sido más los errores que los aciertos. La reciente llegada de los humanos al mundo, los ha colocado en un lugar privilegiado dentro de la cadena de la vida, pero al mismo tiempo, en un estado de vulnerabilidad tal que nunca como ahora, la inminencia de un suicidio colectivo es una posibilidad real. ¡¡Han padecido su inteligencia!! Puesto que más que aprovecharla y deleitarse con las potencialidades que pueden desarrollar, se han dejado seducir por un ego arrogante, propio de mentes adolescentes que no entienden aún su presencia en el universo.

Pero es aquí donde el desafío les conmina a la superación del estilo depredador. De los aciertos de la civilización se pueden señalar, la ciencia y la tecnología, entre otros. Hijas de las culturas, revelan un innegable y ardiente deseo por conocer y transformar. La ciencia se erige como estandarte de una especie curiosa por su propio origen y transformadora de su entorno. Cada cultura, por precaria que sea, ha desarrollado un grado de ciencia y/o tecnología que son propias de su sistema de creencias.

De esta actividad emancipadora (la ciencia), cuyos resultados han mantenido con vida a los humanos desde hace más de cinco mil años, han nacido como audaces burbujas de la mente, como abstractas pompas mutantes: conceptos matemáticos, estructuras biológicas, múltiples recursos lingüísticos, teorías físicas, elucubraciones filosóficas que se han sutilizado y desplegado a través del tiempo, en la medida del interés humano por encontrar respuestas.

En la física, por ejemplo, abundan los puntos de vista y las teorías que hablan del origen y constitución del universo, del papel del hombre en él, de las diversas y fantásticas formas del cosmos, del cómo se han devanado los sesos, generación tras generación tratando de hacer que sus invenciones teóricas coincidan con los azarosos estilos de la realidad. En fin, kilómetros y kilómetros de literatura científica y progreso tecnológico son evidencia de esta lucha. Y en esta sutil vía hay conceptos de conceptos.

Evolución, conciencia, energía, universo corresponden a significaciones macro derivadas de años de profunda reflexión. En especial, estos cuatro conceptos se funden en las novedosas teorías físicas sobre el cosmos. Veamos:

La física contemporánea divide el universo en dos grandes partes: el micro mundo y el macro mundo. Corresponde al primero el conocimiento de las estructuras que van desde  $10^0$  m (la medida del hombre) hasta las dimensiones atómicas ( $10^{-15}$  m y menos), objetos manipulables, átomos, electrones, partículas elementales. El macro mundo es el dominio de lo grande y lo extraordinariamente grande (más de  $10^0$  m hasta  $10^{24}$  m y más), soles, sistemas de estrellas, galaxias, meta galaxias. El micro mundo se ha podido “observar” con microscopios y aceleradores de partículas; el macro con telescopios terrestres, radiotelescopios y satélites. Pero, ¿para qué ha servido esta división?

Últimamente, la mecánica cuántica, es decir, la física del micro mundo, ha mostrado que el universo que habitan los humanos, está constituido de sofisticados elementos llamados “partículas elementales” o incluso, más fundamentales que éstas, de cuerdas (es decir, filamentos unidimensionales que vibran u oscilan y, dicha oscilación determina su estructura, sea un fotón, un electrón, un quark, etc.). Ahora, la materia, tal como se conoce, condensada, está hecha de átomos.

Esta forma de concebir la materia es derivada de la Teoría de la Gran Explosión o Big Bang. En ella, el universo ha tenido varias fases de evolución desde su origen hasta nuestros días.

En esta teoría del Big Bang, existe un ambicioso objetivo: encontrar el momento mismo del “nacimiento” del universo. Las etapas se cuentan en tiempos muy especiales. La Era Planck, menor a  $10^{-43}$  s, donde la temperatura era de  $10^{32}$  K y lo que existía era un algo llamado “gravedad cuántica”, (¿la nada?). En ese momento, las fuerzas de la naturaleza, tal como se conciben hoy, estaban unificadas, no había distinción entre ellas. Luego, viene la inflación, la gran explosión, la separación de las fuerzas y, finalmente, la evolución hacia las partículas, átomos, planetas, galaxias, etc.

Mediciones recientes sobre la conformación a nivel macro del universo, han dilucidado que la composición que se creía en su mayoría de materia como galaxias, planetas, soles, etc., realmente constituye un porcentaje muy pequeño comparado con lo que los científicos han llamado “materia oscura” y “energía oscura”.

El porcentaje mayor estimado de composición del universo es de “energía oscura” con un 70%, frente a un 0.5% de estrellas y un 0.03% de elementos pesados como los que encontramos en la Tierra. Evidentemente, este es uno de los interrogantes más fascinantes del momento. ¿Qué es esa energía oscura? Siendo tan abundante, ¿por qué no se había podido detectar antes? ¿De qué está hecha?

Teóricamente la energía oscura representa una forma de campo que llena el espacio y que acelera la expansión del universo. De la materia oscura se desconoce su estructura, pero se sabe que interactúa con las estrellas, galaxias y demás objetos cósmicos.

Pero bien, ¿cuál es la incidencia importante en la vida humana cotidiana de estas investigaciones tan trascendentales de la física? ¿Qué se aprende de toda esta aventura por los confines del universo? ¿Por qué es tan primordial conocer la estructura del cosmos?

La teoría del Big Bang ha puesto de manifiesto que los humanos son “polvo de estrellas” como diría Carl Sagan. Es decir, energía. Singularidades espacio-temporales cuya constitución hace parte de su propia reflexión. Además de estar hechos de interacciones entre partículas elementales, lo singular se encuentra en el hecho de que tienen corporeidad,

vida, y aún más importante, conciencia, la existencia humana es parte esencial del interrogante sobre la evolución del universo. Son estrellas pensantes, fotones, quarks, átomos y moléculas que se sienten así mismas y se cuestionan, ¡por qué!

Una estrella es energía. El Sol es energía y él alimenta a todas las especies del planeta. La energía, se alimenta a sí misma. Así como hay ciclos de energía en el espacio, por ejemplo, la vida y muerte de las estrellas, del mismo modo, en la Tierra existen ciclos de energía que permiten lo vital y lo hacen evolucionar. Efectivamente, existen procesos de retroalimentación energética que han dado como resultado compendios de magnífica belleza: la vida en sus múltiples manifestaciones. Lo cósmico se recrea en las particularidades de las estructuras vitales de plantas, animales y el hombre mismo.

Toda esta reflexión hace parte del estudio de las energías renovables y más allá. Pero tiene un objetivo fundamental: proponer a los humanos, profundas meditaciones sobre su papel en el mundo, con sus familias, amigos, congéneres en general y una reacción como frutos de esas profundas meditaciones: acciones inteligentes encaminadas no sólo a la conservación del medio ambiente y el uso de las energías renovables, sino muy especialmente, a producir sucesos individuales y colectivos que mejoren las relaciones entre todos los seres humanos, habitantes de la Tierra y, con las otras especies, respetando sus espacios y su sensibilidad.

Los humanos son energía materializada cuyas características principales son:

- Constante transformación como especie y como individuos.
- Hacen parte de una cadena trófica del ecosistema planetario: primero fueron presa, ahora son depredadores, pero pueden llegar a ser armónicos con el cosmos.
- Son transformadores de su entorno y esa transformación puede ser para beneficio de todos a quienes afecte.
- La evolución de la energía humana ha llegado hasta la conciencia con capacidades físicas, intelectuales, emocionales y dimensionales, es decir, relaciones complejas con el universo.

- Esa conciencia transformadora puede aprender el manejo de sus capacidades, de forma inteligente y sensible, logrando el compendio entre aprovechamiento de los recursos con el intercambio como método, no como depredación. Esto permitirá que la evolución de la especie y las demás en el planeta Tierra sea hacia enaltecer la vida en el universo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Gulland, J., & Milne, W. (2008). *Mother Earth News*. . Obtenido de <http://www.motherearthnews.com/Renewable-Energy/2008-04-01/Choosing-Renewable-Energy.aspx#axzz2NF8HMgGb>
- Sampath , W. (2011). *Green Iniciatives*. Obtenido de <http://www.green.colostate.edu/sampath.aspx>
- Celdas solares*. (2010). Obtenido de <http://www.celdas-solares.com/diferencia-entre-celdas-solares-monocristalinas-y-policristalinas/>
- Al-Karaghoul, A., Renne, D., & Kazmerski, L. (2010). Technical and economic assessment of photovoltaic-driven desalination systems . *Renewable Energy*, 323-328.
- ASIF. (2008). *Historia de la energía solar fotovoltaica*. Obtenido de <http://camposolarescoag.com/docs/Historia-de-la-energia-sola.pdf>
- Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento. Banco Mundial. (2010). *www.worldbank.org*. Obtenido de [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)
- Banco Mundial. (2010). *Análisis Ambiental de País*. Bogotá: Casa Editorial El Tiempo.
- Burke, M. (2008). *Earth Policy Institute*. Obtenido de <http://www.worldwatch.org/>
- Cánovas Díaz, E. (2009). *Archivo Digital UPM*. Recuperado el Enero de 2011, de DESARROLLO DE TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN PARA MATERIALES DE BANDA INTERMEDIA: <http://oa.upm.es/1787/>
- Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M. A. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- Congreso de la República de Colombia. (2001). *lawea*. Obtenido de [http://www.lawea.org/documentos/Colombia\\_Ley\\_697.pdf](http://www.lawea.org/documentos/Colombia_Ley_697.pdf)
- Energía solar fotovoltaica. (2013). *Energía solar fotovoltaica*. Obtenido de [http://www.energia-solar-fotovoltaica.info/1\\_Nuevas\\_Tecnologias\\_Solares/index.html](http://www.energia-solar-fotovoltaica.info/1_Nuevas_Tecnologias_Solares/index.html)
- Enríquez Harper, G. (1994). *Fundamentos de electricidad, Volumen 1*. D,F Mexico: Limusa.
- European Communities. (2009). *Photovoltaic Solar Energy. Development and current research*. Obtenido de [http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2009\\_report-solar-energy.pdf](http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2009_report-solar-energy.pdf)

- Fernández Barrera , M. (2010). *Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica*. Madrid, España: Liberfactory.
- Fernández Barrera, M. (2010). *Energía solar: Electricidad fotovoltaica*. Madrid, España: Liberfactory.
- Fernández, S. J. (2008). *Compendio de Energía Solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Fernández, S. J. (2008). *Guía completa de la energía solar fotovoltaica y termoeléctrica. (Adaptada al Código Técnico de la Edificación y al nuevo RITE)*. Madrid (España): A. Madrid Vicente, Ediciones.
- Forero, N., Gordillo, G., Caicedo, L., & Hernández, J. (2006). MONITOREO DE UNA PLANTA SOLAR A PARTIR DE SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DESARROLLADOS CON INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL. *Revista colombiana de Física*, 38(3).
- GIL GARCIA, G. (2008). *ENERGÍAS DEL SIGLO XXI: DE LAS ENERGÍAS FÓSILES A LAS ALTERNATIVAS*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- González, J. C., Rodríguez, F., Vélez, G., & Simbaqueva, O. (1982). *Perfil radiométrico de la ciudad de Bogotá*. Bogotá.
- Gordillo, G. (2000). *Estudio de películas delgadas de semiconductores ternarios basados en CdTe adicionados con S o In*. Obtenido de <http://www.fis.cinvestav.mx/~mlira/con2000.PDF>
- Guevara Vásquez, S. (2003). *Estimación de la radiación solar*. Recuperado el 2011, de [www.bvsde.paho.org/bvsacd/cosude/xxii.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cosude/xxii.pdf)
- Gupta, J. (2010). Utilizar el Sol. Energía solar para producir 20.000 megavatios. *India Perspectivas*, 52-55.
- He, W., Zhang, Y., & Ji, J. (2011). Comparative experiment study on photovoltaic and thermal solar system under natural circulation of water. *Elsevier.com*, 3369-3376.
- Hernández, J., Sáenz, E., & Vallejo, A. (2010). Estudio del Recurso Solar en la Ciudad de Bogotá para el Diseño de Sistemas Fotovoltaicos Interconectados Residenciales. *Revista Colombiana de Física*, 42(2), 161 - 165.
- hormigasolar.com. (2010). *hormigasolar.com*. Obtenido de <http://www.hormigasolar.com/diferencia-entre-celdas-solares-monocristalinas-y-policristalinas>
- Ibáñez Plana, M., Rosell Polo, J., & Urrutia, J. (2005). *Tecnología Solar*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

- Ibañez Plana, M. (2004). *Tecnología solar*. Madrid, España: Grupo Mundi-Prensa.
- infobae.com. (18 de julio de 2012). *infobae.com*. Obtenido de <http://www.infobae.com/notas/607772-El-primer-mapa-de-la-contaminacion-mundial.html>
- Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, INEA. (1996). *Censo, caracterización y grado de satisfacción de los sistemas solares térmicos instalados en Colombia*. Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2011). *IDEAM*. Recuperado el 20 de octubre de 2011, de [https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/021721/PAG\\_1-37.pdf](https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/021721/PAG_1-37.pdf)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (s.f.). *IDEAM*. Recuperado el 20 de octubre de 2011, de <http://institucional.ideam.gov.co>
- IPSE. (2007). *Plan Energético Nacional 2006 - 2025*. Obtenido de [http://www.ipse.gov.co/ipseactual2013/index.php?option=com\\_docman&Itemid=203&lang=es](http://www.ipse.gov.co/ipseactual2013/index.php?option=com_docman&Itemid=203&lang=es)
- Makrides, G., Zinsser, B., Georghiou, G., Schubert, M., & Werner, J. (2010). *Potencial of Photovoltaic Systems in Countries with High Solar Irradiation*. Obtenido de [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
- Malower, J., Pernick, R., & Wilder, C. (2009). *Clean Energy Trends*. Obtenido de <http://www.cleandedge.com/reports/pdf/Trends2009.pdf>
- Martín Jiménez, J. (2008). *Sistemas solares fotovoltaicos. Fundamentos, tecnologías y aplicaciones*. (V. A. Madrid, Ed.) Madrid.
- Martínez, Torres, Hernán. (2010). *Memorias al Congreso de la República 2009-2010*. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).
- Méndez Álvarez, C. E. (2004). *Metodología. Diseño y desarrollo del proceso de investigación* (3a. edición ed.). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Mendez Muñoz, J. M. (2006). *Energía Solar Térmica*. Madrid, España: Fundación Confemetal .
- Ministerio de Energía y Minas. Dirección ejecutiva de proyectos. (2006). Lima.
- Ministerio de Minas y Energía. (2010). *Memorias al Congreso de la República (2009-2010)*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).
- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javidi, A., Mobli, H., Abrinia, K., & Sharifi, A. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1800-1818.



- Naciones Unidas. (2010). *Objetivos de desarrollo del Milenio*. Obtenido de [http://www.un.org/spanish/millenniumgoals/pdf/MDG\\_Report\\_2010\\_SP.pdf#page=54](http://www.un.org/spanish/millenniumgoals/pdf/MDG_Report_2010_SP.pdf#page=54)
- Popp, D., Hascic, I., & Medhi, N. (September de 2009). *Technology and the Diffusion of Renewable Energy*. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/>
- Rodríguez Murcia, H. (2009). *SUELOSOLAR*. Obtenido de <http://www.suelosolar.com/newsolares/newsol.asp?id=6005>
- Rodríguez, H. (2008). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. *Revista de Ingeniería*(28), 83-89.
- Saravia, E. (Noviembre de 2004). *Data Logger*. Obtenido de [www3.fi.mdp.edu.ar/electronica/articulos/DataLogger.doc](http://www3.fi.mdp.edu.ar/electronica/articulos/DataLogger.doc)
- Sociedad Colombiana de Energía Solar y Energías no Renovables. (1988). VI Simposio de energía solar y fuentes nuevas y renovables. *VI Simposio de energía solar y fuentes nuevas y renovables*. Bogotá.
- Solar Energy International. (2007). *FOTOVOLTAICA. Manual de diseño e instalación* (Primera ed.). (B. Henríquez Pérez, Trad.) Canada: New Society International.
- Universidad de Alicante. (s.f.). *La energía solar fotovoltaica en la Universidad de Alicante*. Obtenido de <http://web.ua.es/es/ecocampus/documentos/energia-solar.pdf>
- UPME. (2007). *Plan Energético Nacional 2006-2025*. Obtenido de [http://www.upme.gov.co/Docs/PLAN\\_ENERGETICO\\_NACIONAL\\_2007.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/PLAN_ENERGETICO_NACIONAL_2007.pdf)
- UPME-IDEAM. (2005). *Atlas de Radiación Solar de Colombia*.
- Vásquez, Abeledo, M. (2004). *El Sol, algo más que una estrella*. (Primera edición ed.). Madrid, España: Equipo Sirius, S.A.
- Wikipedia. (s.f.). *Sol*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2010, de <http://es.wikipedia.org/wiki/Sol>